

ОТЗЫВ

официального оппонента Арленинова Петра Дмитриевича

на диссертационную работу Чепилко Сергей Олеговича

«Влияние нелинейной ползучести на напряженно-деформированное состояние сталежелезобетонных конструкций»,

представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.1.9. Строительная механика

1. Актуальность темы диссертационной работы

Особенность работы бетона – выраженная асимметрия свойств при растяжении и сжатии. Плохая работа бетона на растяжение компенсируется в обычных железобетонных элементах работой арматуры. Наиболее полно работа бетона на сжатие реализуется в сталежелезобетонных комплексных балках, в которых бетонная (железобетонная плита) работает совместно со стальной (или стальными) балками, играющими роль внешней арматуры. Параметры таких балок стараются подбирать таким образом, чтобы по возможности исключить работу бетона на растяжение. При этом достигается существенный выигрыш в жесткости. Такого рода конструкции исходно применялись в мостостроении, где общая жесткость является одним из основных требований к конструкции, но и при возведении перекрытий такие конструкции также получили широкое применение. На западе сталежелезобетонные перекрытия с несъемной опалубкой из профнастила часто применяются при строительстве небоскребов, поскольку помимо общей жесткости достигается и существенный выигрыш по весу конструкции. Ясно, что в сравнении с обычным железобетоном в сталежелезобетонных конструкциях металлоёмкость выше, и в каждом конкретном случае проектировщику нужно решать, на какой конструкции остановить свой выбор. Возможно в силу своей металлоемкости в советские времена в СССР сталежелезобетонные

конструкции не получили повсеместного и широкого распространения. Однако в современной России интерес к такого рода конструкциям повышается, и они применяются все чаще и чаще. Это нашло свое отражение и в появлении соответствующих строительных норм, таких как СП 266.1325800.2016 «Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования (с Изменением №1, с Поправкой)» и СП 159.1325800.2014 «Сталежелезобетонные пролетные строения автодорожных мостов. Правила расчета». Соответственно актуализируется и проблема расчета и оптимального проектирования этих конструкций.

Нужно отметить, что даже в нормах основным для сталежелезобетонных балок инженерным расчетом является расчет в упругой постановке. И расчет по предельным состояниям первой группы. Это в некотором смысле крайности, которые соответствуют либо предельным нагрузкам, либо сравнительно низким нагрузкам. Во всех остальных случаях, а это можно считать эксплуатационными нагрузками, начинает сказываться нелинейность поведения бетона, как при кратковременном (мгновенном), так и при длительном приложении нагрузки. В последнем случае в бетоне начинает проявляться такое явление, как ползучесть. Последняя в зависимости от уровня загружений может носить как линейный, так и нелинейный характер.

Таким образом, встает вопрос о корректном учете влияния нелинейности работы бетона, выработке конкретных рекомендаций по расчету и конструированию сталежелезобетонных конструкций, тем самым исследования, как экспериментальные, так и теоретического плана, как данная диссертационная работа, в этом направлении актуальны и важны для практики.

2. Научная новизна исследований и полученных результатов

Научная новизна исследования заключается в том, что автор впервые методически единообразно подошел к вопросу получения разрешающих уравнений для сталежелезобетонных балок.

Автору удалось впервые, пользуясь интегральным уравнением вязко-упруго-пластичности бетона, получить следующие важные результаты для сталежелезобетонных балок:

1) Для мгновенного нагружения получена разрешающая система уравнений, использующая криволинейную диаграмму деформирования бетона (кривая Сарджина).

2) Получена и проанализирована разрешающая система интегральных уравнений линейной ползучести.

3) Получена разрешающая система интегральных уравнений нелинейной ползучести.

4) Для подчиняющейся теории упругой наследственности получены асимптотическое решение системы интегральных уравнений линейной ползучести и асимптотическая система нелинейных уравнений для системы уравнений нелинейной ползучести.

Показано, что в системах САПР допустим линейный расчет с возможной последующим уточнением напряжений в бетоне и стали на основе полученных автором уравнений.

3. Степень обоснованности и достоверности научных результатов и выводов, сформулированных в диссертации

Автор в своих теоретических построениях опирался на общепринятые современные представления, которые базируются на накопленных к настоящему моменту экспериментальных данных. Например, в сталежелезобетонных балках гипотеза плоских сечений выполняется с высокой точностью вплоть до разрушения. Используемая им функция Сарджина закреплена в Еврокодах и отечественных нормах. Интегральное уравнение вязко-упруго-пластичности бетона также считается одним из общепринятых аналитических описаний процесса ползучести. Таким образом, все полученные результаты имеют высокую степень обоснованности.

Полученные автором результаты базируются на использовании строгого математического аппарата, которым он свободно владеет. Также им широко использованы методы и модели строительной механики, теории пластичности и ползучести. Все вычисления проведены с использованием компьютерных систем символьной алгебры. Тем самым достоверность полученных результатов в рамках сделанных допущений не вызывает сомнений.

4. Значимость для науки и практики выводов и рекомендаций диссертации

В общетеоретическом плане значимость выводов, полученных автором результатов, заключается в следующем:

1) Теоретически обоснован метод перехода к асимптотическим системам разрешающих уравнений в случае бетона, подчиняющегося теории упругой наследственности.

2) Выявлена сравнительно слабая зависимость напряжений в стальной балке от нелинейной работы бетона.

3) Показано, что корректная оценка максимальных напряжений в бетонной части сечения СЖБ-балки при высоких уровнях нагружений может быть проведена только с учетом нелинейной работы бетона.

4) Полученные разрешающие уравнения для мгновенного нагружения и ползучести могут быть применены и к расчету обычных железобетонных балок, поскольку никаких ограничений геометрической связности на стальное сечение не накладывалось.

Практическая значимость результатов выводов диссертации:

1) Обоснована возможность использования систем САПР (ЛИРА, SCAD, и т.п.), в расчетах СЖБ-балок с последующим уточнением напряжений в бетоне, поскольку нелинейная работа бетона сравнительно слабо сказывается на работе стальной балки и ее прогибах.

2) Выписанные в явном виде системы нелинейных уравнений могут быть численно решены в современных расчетных комплексах символьной

математики, таких как Mathematica, Maple, MathCad и т.п., что делает их доступной в использовании в повседневной инженерной практике.

5. Оценка содержания работы, её завершенность

Общий объем диссертации составляет 123 страницы и включает в себя 31 рисунок, 11 таблиц и 146 формул. Структурно она состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографии.

Основным содержанием **введения** являются обоснование актуальности выбранной диссертантом темы исследования, сформулированы основные цели и задачи применительно к учету влияния нелинейных процессов в сталежелезобетонных балках, таких как ползучесть и физическая нелинейность диаграммы " $\varepsilon - \sigma$ " бетона, указана научная новизна полученных результатов.

В первой главе традиционно рассмотрены некоторые исторические предпосылки учета нелинейной работы бетона в строительных конструкциях и указано, что с развитием современных вычислительных систем появились возможности отхода от традиционного инженерного расчета по предельным состояниям 1-й группы с использованием понятия пластического шарнира, который хоть и позволяет упростить расчет (в ущерб пониманию реального механизма разрушения железобетонных конструкций), но относится не к области реальных эксплуатационных нагрузок, а к области экстремальных нагружений. Вопрос при каких нагрузках происходит разрушение безусловно важен, но не менее важен вопрос как конструкция будет вести себя при эксплуатационных нагрузках, которые ниже предельных, но для которых возникает необходимость оценки влияния нелинейных процессов в бетоне, включая линейную и нелинейную ползучесть. Автором отмечена несогласованность российских норм, таких как СП 159.1325800.2014 «Сталежелезобетонные пролетные строения автодорожных мостов. Правила расчета» и СП 266.1325800.2016 «Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования (с Изменением №1, с Поправкой)». В конце главы сделан и проиллюстрирован качественный анализ, в котором показан существенный выигрыш по жесткости комплексных сталежелезобетонных балок в сравнении с таки-

ми же балками, но допускающими сдвиг бетонной плиты. Такого рода заключение имеет самостоятельное методическое значение.

Вторая глава получилась достаточно объемной, поскольку в ней рассмотрены вопросы аппроксимирования диаграммы " $\varepsilon - \sigma$ " бетона полиномами с целыми степенями, рассмотрен вопрос уточненного расчета по предельным состояниям сталежелезобетонных балок, а также вывод разрешающей системы нелинейных уравнений для случая мгновенного нагружения.

Несмотря на то, что в настоящее время при рассмотрении различных диаграмм деформирования бетона принят энергетический подход, тем не менее рассмотренный диссертантом анализ полиномиальной аппроксимации диаграммы деформирования бетона и его сравнение с кривой Сарджина представляется интересным и важным.

На основе обобщенной диаграммы работы строительных сталей, нормируемой в отечественных СП, и диаграммы работы бетона с использованием кривой Сарджина, автор провел уточненный расчет по предельным состояниям 1-й группы для сталежелезобетонных балок. Воспользовавшись функцией Хевисайда (функцией единичного скачка), удалось выписать нелинейное уравнение равновесия интегральных внутренних усилий в сечении сталежелезобетонной балки, позволяющее по заданной величине предельной относительной деформации в бетоне определять величину предельной относительной деформации в стальной балке и наоборот. Кроме того, использование функции Хевисайда позволило автору описывать и собственно форму сечения. Данный подход позволил избежать рассматривания алгоритмизации с условными переходами вида «если..., то...», что позволяет избежать написания и отладки программ для определения величины предельного момента. Сравнение получаемых при таком подходе результатов со стандартным инженерным подходом с использованием пластического шарнира в бетоне и двухлинейной диаграммы работы стали (диаграмме Прандтля), показало, что в некоторых случаях разница в расчетах может составлять до 11%.

Для случая мгновенного нагружения СЖБ балки, автор получил разрешающую систему нелинейных уравнений относительно кривизны и положения нейтральной оси в сечении сталежелезобетонной балки, удобную для инженерных расчетов, где в качестве начального приближения используется упругое решение. Автор получил выражение для величины сдвигающей силы на контакте сталь-бетон. Анализ показал, что величина сдвигающей силы сравнительно мало отличается от упругого расчета.

Проведенные модельные расчеты для мгновенного нагружения показали, что в сталежелезобетонных балках первыми всегда начинают «течь» нижние волокна в стальной балке, в то время как для упругого расчета это не обязательно.

В третьей главе автор получил разрешающую систему интегральных уравнений линейной ползучести, исходя из интегрального уравнения ползучести Маслова-Арутюняна. Данное уравнение является частным случаем интегрального уравнения вязко-упруго-пластичности бетона, когда функция напряжений линейна и имеет вид $f(\sigma_b(z,t)) = \sigma_b(z,t)$. Известно, что линейная ползучесть имеет место только при низких уровнях нагружений. Автор провел достаточно подробный качественный анализ полученной системы интегральных уравнений, рассмотрев меры ползучести, отвечающих теории упругой наследственности и теории старения. Для выдержанного бетона, т.е. бетона, подчиняющегося теории упругой наследственности показано, что сталежелезобетон также подчиняется теории упругой наследственности. В случае если бетон подчиняется теории старения, то для сталежелезобетона это не выполняется. Полученные выводы согласуются с выводами профессора В.Д. Харлаба для обычного железобетона. Автору удалось сформулировать и доказать теорему, позволяющую переходить к асимптотике в интегральных уравнениях ползучести с ядром ползучести упругой наследственности. Доказанную теорему автор назвал теоремой Харлаба в честь относительно недавно скончавшегося выдающегося ученого, профессора ГАСУ Вячеслава Даниловича Харлаба, нестрого указавшего способ подобного пере-

хода. С помощью доказанной теоремы автор получил асимптотическое решение для случая теории упругой наследственности. В случае линейной ползучести асимптотическое решение полностью аналогично упругому решению с заменой модуля деформации бетона на длительный модуль деформации.

В четвертой главе на основе интегрального уравнения вязко-упруго-пластичности бетона автор получил разрешающую систему интегральных уравнений нелинейной ползучести.

Как и ранее, воспользовавшись теоремой Харлаба, автор перешел к асимптотике в полученной системе интегральных уравнений нелинейной ползучести. Это позволило выписать нелинейную систему асимптотических уравнений, которую не составляет труда решить численно, используя в качестве начального приближения принимается асимптотическое решение для системы уравнений линейной ползучести. Произведенные модельные расчеты показали, что напряжения в стальной балке «почти» линейны, т.е. сравнительно слабо зависят от нелинейной ползучести, что позволило автору сделать вывод о возможности использования систем САПР в расчетах сталежелезобетонных балках.

В Заключении автор тезисно сформулировал полученные результаты.

6. Автореферат кратко и полно зафиксировано содержание основных результатов диссертации.

7. Основные вопросы и замечания по диссертационной работе

В качестве замечаний необходимо указать автору на следующие моменты:

1. На части рисунков и графиков отсутствуют обозначения осей, расшифровка условных обозначений, в частности рис. 1, 2, 13 и т.д.
2. Обзорная часть диссертации получилась формальной, не в полной мере выполнен обзор современных тенденций в области изучения рассматриваемых сталежелезобетонных конструкций как в нашей стране, так и за рубежом, не приведены алгоритмы расчета по Российским и западным нормам.

3. Автор никак не наметил возможность перехода к асимптотике в случае ядер ползучести более общего вида.
4. Автору нужно было указать, каким образом записываются условия равновесия в случае учета усадки бетона и температурных воздействий, тем самым наметив пути получения разрешающих систем уравнений.
5. Текст диссертации получился предельно сухим и математизированным, автор уделил недостаточное внимание физическому осмыслению полученных им формул, поскольку за ними стоят физические процессы, идущие в бетоне, так например стр 32, 101 отсутствует обоснование учета стальной арматуры плиты перекрытия в составе стальной балки, а бетона плиты отдельно, при таком допущении расчетные деформации ползучести бетонной плиты будут отличаться от истинных деформации железобетонной плиты из-за сдерживающего фактора армирования.
6. Интересно было бы посмотреть сводные таблицы с результатами расчета по методике автора, нормативных документов российских и зарубежных, а также компьютерных программ, такие результаты в работе не приведены.

В целом диссертационная работа производит цельное впечатление и выполнена на высоком теоретическом уровне, а указанные замечания принципиально не влияют на общую оценку ее.

**Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным
Положением о порядке присуждения ученых степеней**

Диссертация Чепилко Сергея Олеговича на соискание ученой степени кандидата технических наук на тему «Влияние нелинейной ползучести на напряженно-деформированное состояние сталежелезобетонных конструкций» является завершенной научно-квалификационной работой.

Учитывая актуальность, научную новизну и практическую значимость полученных результатов, считаю, что диссертационная работа соответствует

критериям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к работам, представленным на диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а ее автор Чепилко Сергей Олегович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.1.9. Строительная механика.

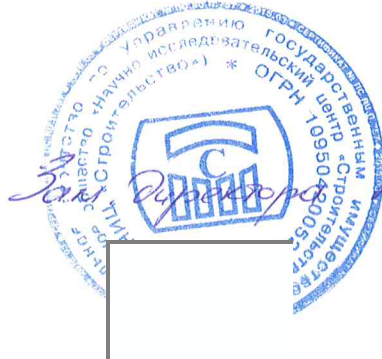
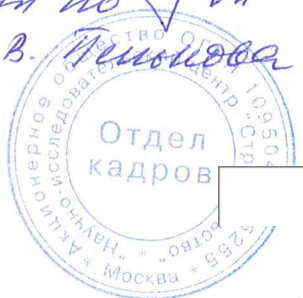
Официальный оппонент:

Арленинов Петр Дмитриевич,
кандидат технических наук по специальности
05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения»,
заместитель заведующего лабораторией №8 «Механики железобетона»
НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ Строительство»
109428, г. Москва, 2-я Институтская ул., д.6, корпус 5

Тел.: + 7 (916) 198-78-41
E-mail: arleninoff@gmail.com

Арленинов
Петр Дмитриевич
28.04.2022

*Получив Арленинова П.Ф.
уведомление;
и. специально по УИИ
персоналу Н.В. Бушкина*



инициатива им. А.А. Гвоздева

Бушкин Н.В.