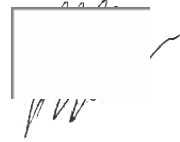


*На правах рукописи*



**ВСЕЕВ Николай Андреевич**

**РАЗВИТИЕ МЕТОДА РАСЧЕТА ЗДАНИЙ  
МОНОЛИТНОЙ КОНСТРУКТИВНОЙ СИСТЕМЫ  
ВО ВЗАИМОДЕЙСТВИИ  
С ОСНОВАНИЕМ ПРИ УЧЕТЕ ФИЗИЧЕСКИ  
НЕЛИНЕЙНОЙ РАБОТЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ  
КОНСТРУКЦИЙ**

Специальность: 05.23.01 –  
Строительные конструкции, здания и сооружения

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент  
**Бабанов Владимир Владимирович**

Официальные  
оппоненты: **Корсун Владимир Иванович**  
доктор технических наук, профессор,  
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский  
политехнический университет Петра Великого»,  
кафедра «Строительство уникальных зданий  
и сооружений», профессор;

**Бенин Андрей Владимирович**  
кандидат технических наук, доцент,  
ФГБОУ ВО «Петербургский государственный  
университет путей сообщения Императора  
Александра I», кафедра «Механика и прочность  
материалов и конструкций», доцент;

Ведущая организация: ОАО «Всероссийский научно-исследовательский  
институт гидротехники имени Б. Е. Веденеева»,  
г. Санкт-Петербург.

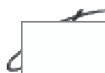
Защита состоится «03» июня 2021 г. в 15:30 часов на заседании диссертационного совета Д **212.223.03** при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4, зал заседаний диссертационного совета (аудитория № 220 главного корпуса).

Тел./факс: 8 (812) 316-58-72; Email: rector@spbgasu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте <http://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/evseev-nikolay-andreevich>.

Автореферат разослан «13» апреля 2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
канд. техн. наук, доцент



Попов Владимир Мирович

# 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

## **Актуальность исследования.**

Учет взаимодействия здания и основания и их нелинейной работы является одним из основных принципов расчетов конструкций при проектировании зданий и сооружений в соответствии с требованиями отечественных норм.

В настоящее время наиболее перспективным направлением расчетов взаимодействия здания с основанием является расчет конструкций на нелинейно-деформируемом полупространстве. Материал конструкций при этом во многих случаях описывается упругой моделью. Однако в работе железобетонных конструкций здания, хотя и в меньшей степени, чем основания, но также неизбежно проявляется нелинейный характер зависимости деформаций и напряжений. Физическая нелинейность железобетона определяется множеством факторов и связана, в первую очередь, с трещинообразованием и пластическими деформациями бетона, а также его реологическими свойствами. Поэтому для анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкций здания и прогнозирования его деформаций с учетом совместной работы с основанием недопустимо игнорировать нелинейное поведение железобетона. Особенную актуальность учет физической нелинейности работы железобетонных конструкций в расчетах имеет в случаях, когда могут ожидать значительные деформации зданий и сооружений: при расчетах тяжелых высотных зданий, а также в случаях сложных инженерно-геологических условий, характерных, например, для Санкт-Петербурга. Слабые глинистые грунты инженерно-геологического разреза города, обладающие большой сжимаемостью, под нагрузкой от здания могут приводить к развитию больших неравномерных осадок здания, что сопровождается неупругими деформациями конструкций.

Несмотря на высокую степень проработки теории нелинейной работы железобетона, нелинейные расчеты конструктивных схем зданий труднореализуемы для практического применения. При проектировании зданий ограничиваются нелинейными расчетами отдельных конструктивных элементов и узлов. Нелинейным расчетом конструктивной системы здания в целом пренебрегают, учитывая физически нелинейную работу железобетонных конструкций упрощенно, путем понижения жесткостных параметров элементов в упругой схеме с помощью понижающих коэффициентов, прописанных в СП 430.1325800 и СП 63.13330. Таким образом, решением квазиупругой задачи инженеры получают представляющие интерес конечные результаты НДС конструктивной системы здания. В России данный подход применяется при расчетах зданий и сооружений всех классов ответственности, в том числе уникальных и технически сложных. В мировой проектной практике данный подход также общепринят для «эффективного расчетного анализа

схем в процессе проектирования» (согласно комментарию R 6.3.1.1 к стандарту США *ACI 318-14*), об этом также утверждается в рекомендациях других зарубежных стандартов.

В отечественных и зарубежных нормах, посвященных упрощенной оценке жесткости железобетонных конструкций, применяются разные подходы к определению понижающих коэффициентов жесткости. При этом следует отметить, что распределение внутренних усилий в конструкциях и характер деформаций здания в расчетной схеме, учитывающей взаимодействие с основанием, зависит от его жесткости. Следовательно, вопрос правильного назначения понижающих коэффициентов жесткости железобетонных конструкций является весьма актуальным для теории и практики расчетов конструкций с учетом взаимодействия с основанием.

#### **Степень разработанности темы исследования.**

В отечественных нормах для учета физической нелинейности железобетона предлагается проводить расчёты по нелинейной деформационной модели с использованием нелинейных диаграмм деформирования материалов. Методы расчета железобетонных конструкций, основанные на нелинейной деформационной модели, развивались в работах В. М. Бондаренко, Н. И. Карпенко, В. И. Колчунова, А. С. Залесова, В. И. Римшина, Б. С. Соколова. Использование нелинейной деформационной модели приводит к результатам, удовлетворительно согласующимся с испытаниями конструкций. В расчетах, проведенных в настоящей работе, данная модель работы железобетонных конструкций рассматривается как эталонная, а результаты расчетов, наиболее близко соответствующие данной модели, считаются наиболее «достоверными» или «корректными».

Среди отечественных работ в области исследования понижающих коэффициентов жесткости для упрощенного моделирования нелинейной работы железобетонных конструкций здания важны исследования А. С. Залесова, Т. А. Мухамедиева, Е. А. Чистякова. Также существует большое число зарубежных научных работ, на основании которых разработаны многочисленные рекомендации, представленные в актуальных национальных стандартах ЕС, США, Канады, Новой Зеландии, Бразилии, Индии, Китая (*Eurocode 2*, *ACI 318*, *CSA A23.4*, *NZS 3101*, *ABNT NBR 6118*, *IS.456*, *GB 50010*), которые зачастую не соответствуют друг другу.

Передовые инженерные исследования в области взаимодействия конструкции и упругого полупространства были выполнены в середине XX века М. И. Горбуновым-Посадовым, И. А. Симвулиди. Совместные расчеты сооружения и основания получили новый импульс, обусловленный развитием современной вычислительной техники, в работах В. М. Улицкого, К. Г. Шашкина, В. А. Шашкина и др. В этих исследованиях основное внимание уделяется нелинейным реологическим моделям основания, поскольку деформации грунта

при практически любых строительных воздействиях являются нелинейными, материал конструкций при этом описывался линейными моделями. Настоящая работа является развитием подхода к расчету конструкций с учетом их взаимодействия с деформируемым полупространством, однако в ней исследуется вклад физически нелинейной работы конструкций в эффекты взаимодействия здания с деформируемой средой. Несмотря на крайнюю актуальность данной темы, например, в случае сложных инженерно-геологических условий и существенной податливости основания, в научно-технической литературе был выявлен дефицит работ, посвященных анализу эффектов взаимодействия нелинейно-деформируемой конструктивной системы здания и деформируемого полупространства, в связи с чем данная тема нуждается в дополнительных исследованиях.

На основании вышеизложенного, с учетом отмеченных проблем, была сформулирована цель и задачи работы.

**Целью диссертационной работы** является развитие метода расчета зданий во взаимодействии с деформируемым полупространством при использовании упругой модели железобетонных конструкций, таким образом, чтобы его результаты удовлетворительно соответствовали расчетам с использованием нелинейной деформационной модели железобетона.

Для достижения этой цели сформулированы следующие **задачи**:

- анализ и обобщение отечественных и зарубежных исследований физически нелинейной работы железобетона, подходов по упрощенному математическому моделированию нелинейной работы железобетонных конструкций в численных расчетах упругих схем;

- сравнительный анализ величин понижающих коэффициентов жесткости железобетонных конструкций, приводимых в технической литературе, с результатами, полученными с использованием нелинейной деформационной модели железобетона;

- оценка достоверности численных расчетов с использованием нелинейной деформационной модели железобетона путем сравнения с результатами натурных измерений, а также с аналитическими расчетами по действующим нормам;

- для модельных задач и существующего объекта выполнение цикла численных расчетов системы «основание – фундамент – здание» с использованием упругой (с различными вариантами понижающих коэффициентов жесткости) и нелинейной деформационной моделей работы железобетонных конструкций; количественная и качественная оценка влияния физически нелинейной работы железобетонных конструкций на НДС конструктивной системы (при расчете здания на основании), сравнение с принятыми нормативными подходами;

- разработка методики назначения понижающих коэффициентов жесткости для упрощенного учета физической нелинейности железобетонных

конструкций в совместных конечно-элементных расчетах здания на основании в виде деформируемого полупространства;

– оценка эффективности разработанной методики учета физически нелинейной работы железобетонных конструкций по сравнению с традиционно используемыми в проектной практике нормативными методами.

**Объект исследования** – монолитная железобетонная конструктивная система здания.

**Предмет исследования** – изгибная жесткость и НДС железобетонных конструкций здания, взаимодействующего с деформируемым полупространством, с учетом нелинейной работы железобетона.

**Область исследования** соответствует требованиям паспорта научной специальности ВАК: 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения, а именно: содержанию специальности: совершенствование методов расчета конструкций, научно-технические исследования и разработки в области рационального проектирования конструктивных решений зданий и сооружений. Направление области исследования соответствует п. 3 паспорта специальности: «Создание и развитие эффективных методов расчета строительных конструкций, наиболее полно учитывающих специфику воздействий на них, свойства материалов, специфику конструктивных решений и другие особенности».

**Научная новизна** исследования

1. Выявлено несоответствие коэффициентов, упрощенно учитывающих снижение жесткости конструкций за счет физически нелинейной работы железобетона согласно СП 63.13330, СП 430.1325800 и зарубежной литературе, результатам нелинейных расчетов с использованием нелинейной деформационной модели железобетона. Установлено, что использование предложенных в литературе значений понижающих коэффициентов может приводить к завышению жесткости конструкций.

2. На основании обобщения результатов расчетов различных железобетонных элементов по нелинейной деформационной модели выявлена закономерность изменения коэффициента снижения изгибной жесткости сечения после трещинообразования при длительном действии нагрузки как линейно возрастающей функции, зависящей от параметра, учитывающего соотношение изгибной жесткости бетона сечения к жесткости армирования.

3. Доказано, что результаты совместных расчетов основания и здания в квазиупругой постановке работы железобетона могут с удовлетворительной точностью согласовываться с результатами расчета с использованием нелинейной деформационной модели железобетона в том случае, если применить упрощенный учет снижения изгибной жесткости здания по разработанной методике.

4. Произведена оценка влияния физически нелинейной работы железобетонных конструкций на НДС системы «здание – основание», показывающая, что учет физической нелинейности железобетона в совместных

расчетах здания и основания значительно влияет на величины деформаций и на усилия в конструкциях здания. При этом использование упругой модели железобетона с нормативными величинами коэффициентов снижения жесткости приводит к недооценке неравномерности осадок здания.

### **Теоретическая значимость работы**

В работе показано, что для большого числа типов сечений железобетонных конструкций возможно определить понижающие коэффициенты жесткости, позволяющие заменить сложные нелинейные расчеты конструкций с использованием нелинейной деформационной модели железобетона на упрощенные квазиупругие расчеты без существенной потери точности. Установлено, что при корректном назначении коэффициентов понижения жесткости результаты расчета железобетонных конструкций здания с основанием с удовлетворительной точностью согласуются с результатами более сложных расчетов с использованием нелинейной деформационной модели железобетона. Разработанная методика важна для дальнейшего развития методов совместных расчетов взаимодействия здания и основания с учетом физической нелинейности железобетона.

### **Практическая значимость работы**

Предлагаемая методика учета нелинейной работы железобетонных конструкций позволяет выполнять численное моделирование работы здания на деформируемом полупространстве в квазиупругой постановке. Это дает возможность снизить сложность расчетов и длительность вычислений с учетом нелинейной работы железобетона, что особенно актуально для расчетов конструкций в реальной проектной практике. Разработанная методика использовалась при совместных расчетах с основанием жилых и общественных зданий в г. Санкт-Петербург и г. Омск, что подтверждается актом о внедрении ООО «ПИ Геореконструкция».

**Методология и методы диссертационного исследования** включают методы численного моделирования задач совместной работы конструкций и деформируемой среды с применением верифицированных сертифицированных программных комплексов, реализующих метод конечных элементов. При этом используются методы строительной механики, теоретические и экспериментальные данные, полученные отечественными и зарубежными учеными в области изучения железобетонных конструкций.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Коэффициенты, упрощенно учитывающие снижение жесткости конструкций за счет физически нелинейной работы железобетона согласно СП 63.13330, СП 430.1325800 и зарубежной литературе, не соответствуют результатам нелинейных расчетов с использованием нелинейной деформационной модели железобетона и могут приводить к завышению жесткости конструкций.

2. Формула для оценки величины снижения изгибной жесткости железобетонного элемента после трещинообразования при длительном действии нагрузки, разработанная на основе аппроксимации результатов расчетов с использованием нелинейной деформационной модели, с достаточной степенью точности соответствует результатам нелинейных расчетов и натуральных экспериментов.

3. Разработанная методика учета снижения изгибной жесткости здания монолитной конструктивной схемы с удовлетворительной точностью соответствует результатам совместных расчетов системы «здание – основание» с использованием нелинейной деформационной модели железобетона в отличие от нормативных методов, которые приводят к завышению изгибной жесткости здания.

4. При расчетах здания на деформируемом полупространстве физически нелинейная работа железобетона оказывает значительное влияние на деформации и на усилия в конструкциях здания, значения которых существенно отличаются от расчетов, учитывающих физическую нелинейность работы железобетонных конструкций упрощенно по СП 63.13330 и СП 430.1325800.

**Степень достоверности результатов** диссертационной работы обеспечивается тем, что:

– в качестве эталонного решения задачи о деформировании нормального сечения железобетонного элемента принимается точное решение с использованием нелинейной деформационной модели железобетона в соответствии с СП 63.13330, которая хорошо согласуется с результатами экспериментов по данным многочисленных исследований;

– результаты расчетов прогибов железобетонного элемента с использованием предложенной формулы для оценки величины снижения изгибной жесткости изгибаемого сечения железобетонного элемента после трещинообразования соответствуют результатам натуральных испытаний изгибаемых элементов при длительном действии нагрузки, проведенных разными авторами;

– для установления достоверности результатов численных решений нелинейных задач разработана и апробирована многоэтапная процедура верификации, включающая сопоставление результатов расчета с точными решениями, заложенными в действующих нормах, и результатами натуральных измерений на существующем объекте.

#### **Апробация работы**

Результаты работы докладывались и обсуждались на конференциях:

– XII Всероссийская научно-практическая конференция «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации». ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», г. СПб, 2016 г;

– Всероссийская научно-техническая конференция «Инженерно-геотехнические изыскания, проектирование и строительство оснований фундаментов и подземных сооружений». ФГБОУ ВО СПбГАСУ, г. СПб, 2017 г;

– 70-я Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства». ФГБОУ ВО СПбГАСУ, г. СПб, 2017 г;

– XIII Всероссийская научно-практическая конференция «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации». ФГБОУ ВО РАНХиГС, г. Москва, 2017 г;

– Научно-практическая конференция «Неделя науки-2018». ФГБОУ ВО ПГУПС, г. СПб, 2018 г;

– Научно-практический семинар Технического комитета «Взаимодействие оснований и сооружений» с участием президента «*International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*» ISSMGE профессора Чарльза Нг, ФГБОУ ВО ПГУПС, г. СПб, 20 апреля 2018 г.

– Международная конференция по геотехнике и архитектуре «Подземная урбанистика: архитектура и геотехника». Санкт-Петербургский Дом Архитектора, г. СПб, 19–21 сентября 2018 г.

– Международная научно-техническая конференция: «Фундаментальные и прикладные вопросы геотехники: новые материалы, конструкции, технологии и расчеты». ФГБОУ ВО СПбГАСУ, г. СПб, 6–8 февраля 2019 г.

### **Публикации**

Материалы диссертации опубликованы в 9 печатных работах, в том числе 7 изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных журналов, утвержденных ВАК Российской Федерации и 1 статья опубликована в сборнике, индексируемом в международной базе данных *Scopus*.

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, 5 глав, основных выводов, списка литературы и 7 приложений. Она имеет объем 175 страницы печатного текста, включая 116 рисунков и 6 таблиц. Список литературы включает 133 наименований, в том числе 39 на иностранных языках.

Во *введении* обоснована актуальность проводимых исследований, сформулирована проблема, цель, задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, степень достоверности результатов и апробация работы. В *первой главе* кратко рассмотрены особенности физически нелинейной работы железобетонных конструкций, методы расчета физически нелинейной работы конструкций. Во *второй главе* анализируются упрощенные подходы по учету физической нелинейности при упругом расчете конструктивных схем. Производится сравнение величин понижающих коэффициентов, представленных в литературе, со значениями, полученными с использованием нелинейной деформационной модели работы

железобетона. В *третьей главе* разработана формула для оценки величины снижения изгибной жесткости балки после трещинообразования при длительном действии нагрузки. Результаты расчетов прогибов железобетонной балки с использованием предложенной формулы сопоставляются с результатами нелинейных расчетов и натурных экспериментов при длительном действии нагрузки. Разработана методика упрощенного учета снижения жесткости здания за счет физически нелинейной работы железобетонных конструкций. В *четвертой главе* производится сопоставление нелинейных численных расчетов с использованием ПК «Лира-САПР» с нелинейными расчетами по СП 63.13330 и данными натурных измерений с целью дальнейшего использования программы при численном моделировании. В *пятой* главе представлены результаты численных экспериментов – цикла расчетов системы «здание – основание» с использованием упругой и нелинейной деформационной моделей железобетона для модельных расчетных схем, а также для существующего объекта. Выполнена количественная и качественная оценка влияния физически нелинейной работы железобетонных конструкций на НДС конструктивной системы на упругом основании. Произведено сравнение результатов нелинейного расчета с нормативными подходами и с предлагаемой уточненной методикой назначения изгибной жесткости здания. Показано, что разработанная методика позволяет получать результаты, удовлетворительно совпадающие с результатами нелинейных расчетов.

## II. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИССЕРТАЦИИ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

**1. Коэффициенты, упрощенно учитывающие снижение жесткости конструкций за счет физически нелинейной работы железобетона согласно СП 63.13330, СП 430.1325800 и зарубежной литературе, не соответствуют результатам нелинейных расчетов с использованием нелинейной деформационной модели железобетона и могут приводить к завышению жесткости конструкций.**

В технической литературе существует большой разброс значений коэффициентов снижения жесткости. Однако во всех рекомендациях указаны одинаковые предпосылки упругого расчета схемы: нелинейная работа железобетонных конструкций считается незначительной; изменение жесткостей оказывает незначительное влияние на величины изгибающих моментов; влияние армирования на величину жесткости сечения можно не учитывать; распределение усилий зависит от соотношения жесткостей элементов статически неопределимой системы, а не от их абсолютного значения. По результатам анализа различных источников литературы можно выделить два принципиальных подхода к назначению понижающих коэффициентов жесткости: 1) Учитывать более выраженную нелинейную работу горизонтальных несущих конструкций за счет трещинообразования, принимать для них понижающий коэффициент в 1,5–2 раза меньше, чем для вертикальных; 2) Не учитывать снижение жесткости железобетонных конструкций.

При расчете по СП 430.1325800 рекомендуется принимать модуль упругости материала с понижающими коэффициентами относительно начального модуля упругости бетона  $E_b$ : 0,6 – для вертикальных сжатых элементов; 0,2–0,3 – для горизонтальных. При расчете по СП 63.13330 обычно принимают для всех конструкций здания одинаковые понижающие коэффициенты относительно начального модуля упругости бетона при продолжительном действии нагрузки  $k = 1/(1 + \varphi_{b,cr})$ , где  $\varphi_{b,cr}$  – коэффициент ползучести бетона, принимаемый в зависимости от класса прочности бетона и относительной влажности окружающей среды.

Нелинейная деформационная модель работы сечения, рекомендованная СП 63.13330, принята в качестве эталонного расчета, с которым и будут сравниваться результаты расчетов. Согласно многочисленным экспериментам различных авторов результаты расчетов с использованием нелинейной деформационной модели удовлетворительно согласуются с натурными испытаниями конструкций.

Выполнено сравнение результатов расчета железобетонного сечения с использованием нормативных коэффициентов снижения жесткости по СП 430.1325800 и подхода с учетом рекомендаций СП 63.13330 с результатами расчета сечения с использованием нелинейной модели железобетона при длительном действии нагрузки.

Для примера представлены нелинейные расчеты сечения, приведенного на Рисунке 1. Бетон класса В25. Армирование – симметричное. Процент армирования  $\mu = 0,78\%$ . Для учета физической нелинейности работы бетона использовался трехлинейный вариант аппроксимации кривой деформирования бетона (см. Рисунок 1, б). Учет длительности действия нагрузки осуществлялся заданием пониженного модуля деформации по формуле:  $E_{b,\kappa} = E_b / (1 + \varphi_{b,cr})$ . В рассматриваемом случае значение коэффициента, учитывающего длительность действия нагрузок (при относительной влажности среды выше 75 %), составит:  $1 / (1 + 1,8) = 0,36$ . Для учета нелинейной работы арматуры А400 использовалась билинейная диаграмма деформирования стали (см. Рисунок 1, в).

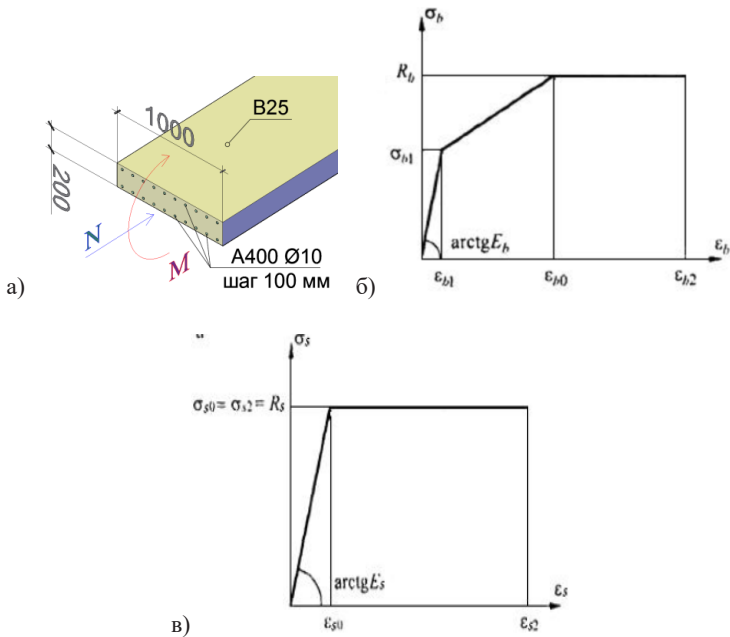


Рисунок 1 – Рассматриваемое сечение (а). Диаграммы деформирования по СП 63.13330: трехлинейная для бетона (б); билинейная для арматуры (в)

Коэффициент снижения жесткости определяем по формуле:  $k = D_{nl} / D_{el}$ , где  $D_{nl}$  – жесткость элемента, учитывающая физически нелинейную работу железобетона,  $D_{el}$  – жесткость элемента, учитывающая линейную работу материала, с начальным модулем упругости бетона  $E_b$ , без учета армирования.

Для изгибной жесткости:  $D_{el} = E_b \cdot I$ , где  $I$  – момент инерции бетонного сечения без учета армирования.

Для жесткости на продольное усилие:  $D_{el} = E_b \cdot A$ , где  $A$  – площадь бетонного сечения без учета армирования.

Изгибная жесткость элемента с учетом трещин и неупругих деформаций определена как отношение действующего момента к кривизне:  $D_{nl} = M/\kappa$ .

Жесткость элемента на продольное усилие с учетом неупругих деформаций определена как отношение продольной силы к продольной деформации:  $D_{nl} = N/\varepsilon$ .

На Рисунке 2,а представлены графики зависимости понижающего коэффициента изгибной жесткости сечения от изгибающего момента по результатам расчета по различным методикам для изгибаемого сечения. На Рисунке 2,б представлены графики зависимости понижающего коэффициента жесткости сечения на продольное сжатие от величины его продольной деформации по результатам нелинейного расчета и согласно нормам.

По результатам анализа построенных диаграмм установлены существенные несоответствия рекомендаций СП 430.1325800 и СП 63.13330 по назначению понижающих коэффициентов жесткости расчетам с использованием нелинейной деформационной модели железобетона. В ряде случаев рекомендации норм ведут к завышению жесткости несущих конструкций из-за недоучета основных факторов нелинейной работы железобетонных конструкций (трещинообразования, ползучести, пластических деформаций бетона) и могут приводить к получению неверного распределения усилий в элементах расчетной схемы. В рекомендациях СП 430.1325800 понижающий коэффициент жесткости для вертикальных несущих конструкций недооценивает эффект ползучести бетона, что может приводить к завышению жесткости конструкций при длительном действии нагрузок более чем в два раза. Назначение жесткости элементов расчетной схемы в соответствии с рекомендациями СП 63.13330 приводит к недооценке снижения жесткости за счет трещинообразования, возникающего в горизонтальных железобетонных конструкциях. Это может приводить к завышению жесткости конструкций здания, работающих на изгиб, более чем в два раза. Рекомендации зарубежных стандартов также предлагают завышенные значения понижающих коэффициентов жесткости.

Некорректное назначение жесткости элементов конструкции приводит к завышению жесткости расчетной схемы здания в целом и, соответственно, недооценке неравномерностей его осадок, как показано далее.

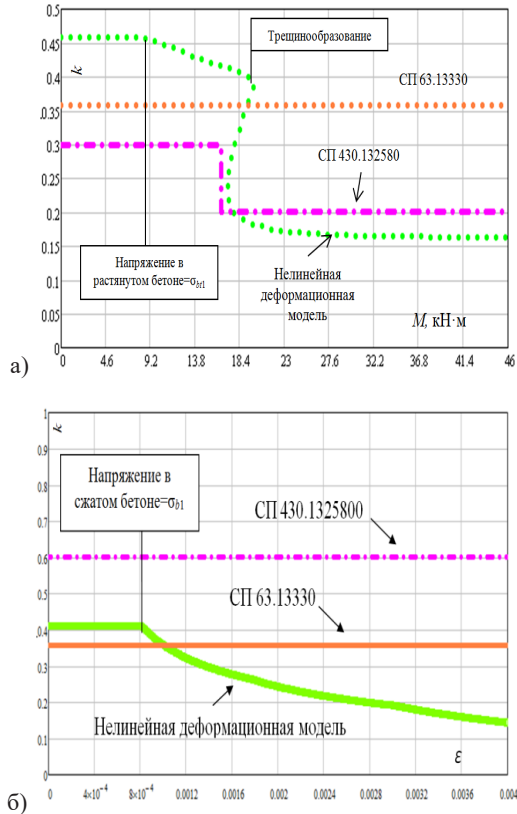


Рисунок 2 – Зависимость «понижающий коэффициент изгибной жесткости – изгибающий момент (кН·м)» для изгибаемого элемента с учетом длительного действия нагрузки (а). График зависимости понижающего коэффициента жесткости на сжатие от продольной деформации при сжатии сечения с учетом длительного действия нагрузки (б)

**2. Формула для оценки величины снижения изгибной жесткости железобетонного элемента после трещинообразования при длительном действии нагрузки, разработанная на основе аппроксимации результатов расчетов с использованием нелинейной деформационной модели, с достаточной степенью точности соответствует результатам нелинейных расчетов и натуральных экспериментов.**

Основным силовым фактором, характеризующим напряженное состояние горизонтальных несущих конструкций, является изгибающий момент.

Из диаграммы (см. Рисунок 2, а) видно, что после падения изгибной жесткости балки вследствие трещинообразования жесткость конструкции в сечении с трещиной остается практически постоянной до момента разрушения. Данный факт обуславливает возможность использования в практических расчетах коэффициентов снижения жесткости вместо точного решения по нелинейной деформационной модели.

На основании расчета с использованием нелинейной деформационной модели для основных типов сечений железобетонных плит была построена зависимость коэффициента снижения изгибной жесткости  $k_1$  сечения после трещинообразования от комплексного параметра  $(E_s \cdot I_s)/(E_b \cdot I_b)$  (см. Рисунок 3, а) при длительном действии нагрузки. Расчет производился для плит со следующими параметрами сечения: высота сечения: 0,15...0,60 м; процент армирования сечения: 0,5 ... 1,5 %; толщина защитного слоя: 10...40 мм; класс прочности бетона: В25...В50 (относительная влажность среды выше 75 %); арматура А400. На графике прослеживается линейная зависимость  $k_1$  от параметра  $(E_s \cdot I_s)/(E_b \cdot I_b)$ , с достаточной степенью точности аппроксимируемая функцией, представленной на Рисунке 3,а:

$$k_1 = 1,25 \cdot \frac{E_s \cdot I_s}{E_b \cdot I_b} + 0,03, \quad (1)$$

где  $I_b, I_s$  – моменты инерции соответственно бетонного сечения и арматуры относительно центра тяжести поперечного сечения элемента;  $E_s, E_b$  – соответственно модуль упругости арматуры, начальный модуль упругости бетона.

Данную функцию рекомендуется использовать для определения коэффициента  $k_1$  снижения изгибной жесткости сечения в зонах трещинообразования при длительном действии нагрузки. Полученный коэффициент позволяет оценивать падение жесткости сечения после трещинообразования при длительном действии нагрузки и с достаточной степенью точности соответствует расчетам сечения по нелинейной деформационной модели, а также результатам натуральных испытаний балок.

**3. Разработанная методика учета снижения изгибной жесткости здания монолитной конструктивной схемы с удовлетворительной точностью соответствует результатам совместных расчетов системы «здание – основание» с использованием нелинейной деформационной модели железобетона в отличие от нормативных методов, которые приводят к завышению изгибной жесткости здания.**

Корректная оценка изгибной жесткости схемы важна при расчетах взаимодействия здания и деформируемого полупространства в связи с характерной формой осадок зданий, изображенной на Рисунке 4,а.

При моделировании нелинейной работы железобетонных конструкций в совместных расчетах здания и основания требуется оценка длительной работы конструкций здания, для чего необходим учет ползучести бетона. При этом для получения решения в квазиупругой постановке, соответствующего решению в нелинейной постановке, значение понижающего коэффициента жесткости бетона не должно превышать величины  $1/(1+\varphi_{b,cr})$  по СП 63.13330.

Изгиб здания будет приводить к возникновению продольных растягивающих усилий в нижних уровнях здания и сжимающих в верхних. При этом нужно учитывать, что в зонах трещинообразования жесткость сечений перекрытий на сжатие и растяжение будет существенно снижена (Рисунок 4, б).

На основании расчета с использованием нелинейной деформационной модели для основных типов сечений железобетонных плит была построена зависимость коэффициента снижения жесткости сечения на продольное усилие после трещинообразования при длительном действии нагрузки  $k_2$  от процента армирования сечения  $\mu$  (см. Рисунок 3, б). Расчет производился для плит с различными параметрами сечений, рассмотренных ранее в п. 2. Поскольку при проектировании относительные неравномерности осадок здания существенно ограничиваются, деформации сжатия и растяжения перекрытий также очень незначительны. В этом случае коэффициенты снижения жесткости на продольное сжатие и растяжение сечения после трещинообразования оказываются примерно равными. На графике (см. Рисунок 3, б) прослеживается линейная зависимость  $k_2$  от  $\mu$ , аппроксимируемая функцией, представленной на Рисунке 3, б:

$$k_2 = 9,46 \cdot \mu + 0,07, \quad (2)$$

где  $\mu$  – процент армирования сечения, д.е.

Разработанная методика предполагает использование упрощения, рекомендуемого различными литературными источниками с принципиальным разделением понижающих коэффициентов жесткости для конструкций с отсутствием и наличием трещин.

Жесткость горизонтальных несущих конструкций в коротких наиболее напряженных участках вероятного трещинообразования – в пролете и надпорной зоне (см. Рисунок 4, б) принимается с учетом  $k_1$  и  $k_2$  – коэффициентов снижения жесткости сечения на изгиб и на продольное усилие, определяемых по формулам (1) и (2) соответственно. В связи с тем, что в используемом в работе программном комплексе отсутствует возможность дифференцированного изменения жесткости пластины на изгиб и продольное усилие, в расчетах пересчитывались параметры пластины перекрытий  $E$  и  $h$  решением системы уравнений:

$$\begin{cases} k_1 \cdot E_b \cdot h^3 = E_{eq} \cdot h_{eq}^3 \\ k_2 \cdot E_b \cdot h = h_{eq} \cdot E_{eq} \end{cases},$$

где  $E_b$  – начальный модуль упругости бетона;  $h$  – высота сечения плиты перекрытия;  $E_{eq}$ ,  $h_{eq}$  – пересчитанные искомые значения модуля упругости и высоты сечения плиты.

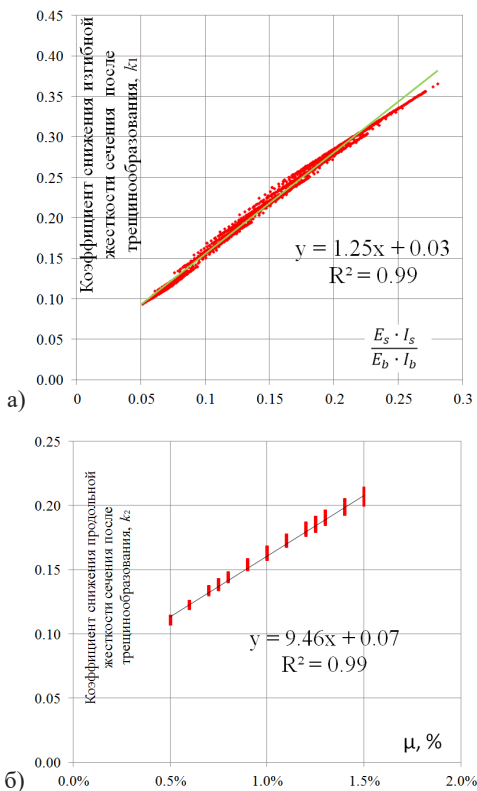


Рисунок 3 – Графики зависимости понижающих коэффициентов жесткости сечения после трещинообразования от параметров сечения при длительном действии нагрузки:

- а) – график «понижающий коэффициент изгибной жесткости  $k_1 - (E_s \cdot I_s) / (E_b \cdot I_b)$ » для различных конструкций изгибаемого сечения; б) – график «понижающий коэффициент продольной жесткости сечения после трещинообразования ( $k_2$ ) – продольное армирование ( $\mu$ )» для различных конструкций сечения

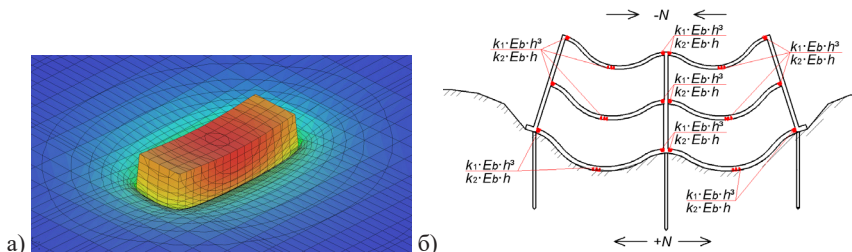


Рисунок 4 – Характер деформации здания при расчете на деформируемом полупространстве (а). Схема для определения изгибной жесткости здания стеновой конструктивной схемы. Красным цветом отмечены участки трещинообразования (б)

В практических случаях проектирования нового строительства вследствие ограничения неравномерности осадок здания трещинообразование в стенах при изгибе здания отсутствует, и жесткость вертикальных конструкций, а также участков горизонтальных конструкций без трещин вполне допустимо определять лишь понижающим коэффициентом  $k = 1/(1 + \varphi_{b,cr})$ . Для более точного соответствия упругого расчета нелинейному расчету следует пользоваться приведенным модулем упругости бетона и арматуры:  $E = k \cdot E_b \cdot (1 - \mu) + \mu \cdot E_s$ , где  $E_s$  – модуль упругости арматуры;  $\mu$  – коэффициент армирования;  $E_b$  – начальный модуль упругости бетона.

С использованием разработанной методики были построены графики зависимости изгибающего момента в сечении здания от кривизны сечения здания (см. Рисунок 5) и графики зависимости относительной неравномерности осадок здания стеновой конструктивной схемы (см. Рисунок 7) от параметра  $D_{ст}/D_{пер}$ , где  $D_{ст}$  и  $D_{пер}$  – изгибные жесткости стенки условного «двутавра» и суммарная изгибная жесткость перекрытий – полок «двутавра» относительно центра тяжести сечения (см. Рисунок 5). Графики построены для здания 1 – 6 этажей при высоте этажа 4 м при толщине перекрытий и стен 0,2 м (см. Рисунок 5). Основание зданий в схемах моделировалось объемными упругими телами. Следует отметить, что внимание сфокусировано на работе надземных конструкций, поэтому нелинейная работа среды основания не рассматривалась. Конструкции здания моделировались конечными элементами оболочки.

Расчеты выполнены для четырех схем работы железобетона:

- а) Упругая схема, понижающие коэффициенты по СП 430.1325800.
- б) Упругая схема, понижающие коэффициенты по СП 63.13330 (бетон В25 (относительная влажность среды выше 75 %)).
- в) С учетом нелинейной работы железобетона с фактическими параметрами армирования конструкций. Для учета физической нелинейности бетона

использовался трехлинейный вариант аппроксимации кривой деформирования бетона В25 с учетом модуля деформации бетона при продолжительном действии нагрузки (относительная влажность среды выше 75 %). Диаграмма деформирования арматуры класса по прочности А400 – билинейная.

г) С учетом квазиупругой работы железобетонных конструкций согласно разработанной методике.

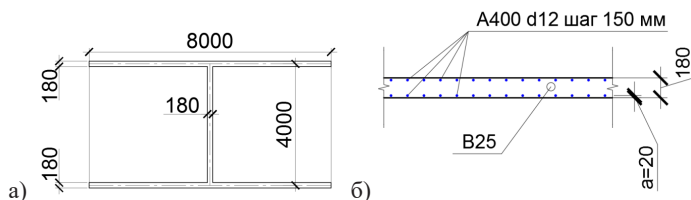


Рисунок 5 – Параметры рассматриваемого сечения здания (а).  
 Конструкция плиты перекрытия ( $k_1 = 0,172$ ,  $k_2 = 0,153$ );  
 $E_{eq} = 4311848$  кПа;  $h_{eq} = 0,191$  м (б)

Разница в оценке изгибающего момента в сечении здания при задании различной кривизны этому сечению (см. Рисунок 6,а) между нелинейным и упругими расчетами с нормативными понижающими коэффициентами составила 37 % при расчете по СП 430.1325800 и 119 % при расчете по СП 63.13330 (см. Рисунок 6, б). Т.е. изгибная жесткость здания, полученная с использованием коэффициентов по рекомендациям норм, существенно завышена по сравнению с физически нелинейным расчетом, соответственно, неравномерность осадок по рекомендациям норм недооценивается (см. Рисунок 7). При меньшей высоте здания (малом значении  $D_{cr}$ ), когда вклад жесткости перекрытий в изгибную жесткость сечения здания наиболее значителен, рекомендации СП 63.13330 больше завышают жесткость здания, нежели рекомендации СП 430.1325800, поскольку недооценивают снижение жесткости перекрытий вследствие трещинообразования в них. При увеличении высотности здания (увеличении значения  $D_{cr}$ ) рекомендации СП 430.1325800 больше завышают жесткость здания, нежели рекомендации СП 63.13330, поскольку недоучитывают длительное снижение жесткости системы за счет ползучести бетона стен.

Результаты расчета изгибной жесткости сечения здания (см. Рисунок 5, б) и относительных неравномерностей осадок (см. Рисунок 7) по предложенной методике хорошо согласуются с результатами по нелинейной деформационной модели, расхождения в результатах расчетов по серии выполненных численных экспериментов не превышают 5 %.

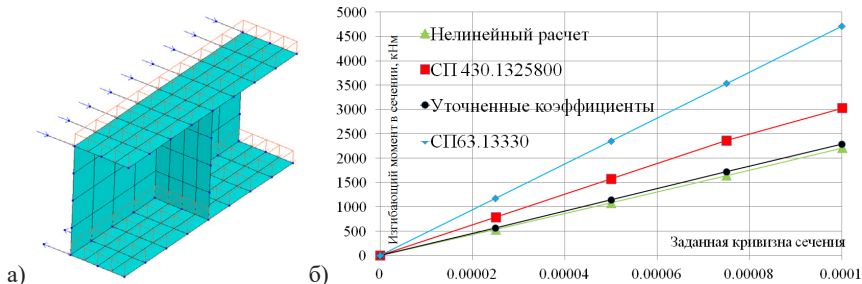


Рисунок 6 – Расчетная схема участка здания (а). Зависимость «заданная кривизна сечения здания – изгибающий момент (кН · м)» (б)

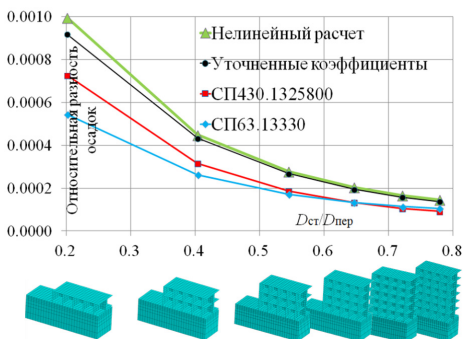


Рисунок 7 – Сопоставление численных расчетов по оценке деформаций здания с повышением этажности при осадках основания равных предельно допускаемой нормами величине – 18 см

**4. При расчетах здания на деформируемом полупространстве физически нелинейная работа железобетона оказывает значительное влияние на деформации и на усилия в конструкциях здания, значения которых существенно отличаются от расчетов, учитывающих физическую нелинейность работы железобетонных конструкций упрощенно по СП 63.13330 и СП 430.1325800.**

Выполнен цикл численных расчетов системы «здание – основание» с использованием упругой и нелинейной деформационной моделей железобетона. Анализировались три эффекта, характеризующие НДС конструктивной системы здания на деформируемом полупространстве, которые возникают в расчетах при учете нелинейности железобетонных конструкций.

1) Большая податливость конструктивной системы за счет физической нелинейной работы ожидаемо приводит к увеличению относительных неравномерностей осадок здания.

2) Характер распределения вертикальных напряжений при проведении совместных расчетов здания и основания вызывает перегрузку периметральных свай и периметральных участков стен и приводит к снижению усилий в вертикальных конструкциях, расположенных ближе к центру здания. Неравномерность перераспределения нагрузок между контурными и внутренними конструкциями здания будет тем существеннее, чем больше жесткость здания. Физически нелинейная работа железобетона приводит к снижению жесткости здания и снижению концентрации напряжений в периметральных конструкциях здания по сравнению с расчетом, основанном на использовании упругой модели работы железобетона.

3) Неравномерные осадки приводят к возникновению растягивающих напряжений в перекрытиях нижних уровней здания и сжимающих в верхних. Развитие трещин в горизонтальных конструкциях здания приводит к снижению их жесткости на действие продольных усилий и снижению в них напряжений.

Рассмотрено 4 группы расчетных схем (см. Рисунки 8, 9): плита на упругом основании толщиной 600 и 400 мм (расчет выполнялся без учета жесткости надземных конструкций, что допустимо, например, для податливого каркасного здания); здания стеновой конструктивной схемы: «жесткая» схема (6-этажное здание) и более «податливая» схема (1-этажное здание).

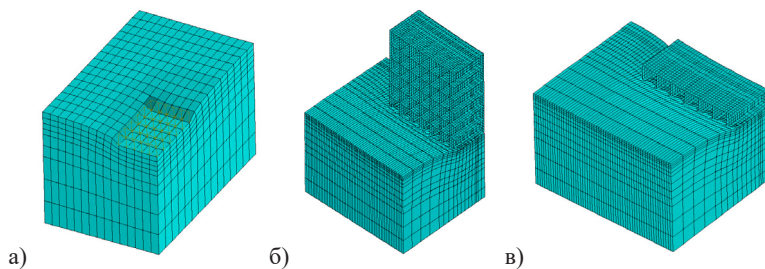


Рисунок 8 – Деформированные расчетные схемы:  
а) – плита, б) – 6-этажное здание, в) – 1-этажное здание

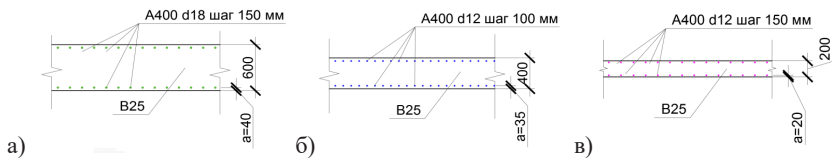


Рисунок 9 – Конструкция фундаментных плит и плит перекрытия в расчетных схемах: а) – фундаментная плита 600 мм:  $k_1 = 0,127$ ; б) – фундаментная плита 400 мм:  $k_1 = 0,141$ ; в) – плита перекрытия 200 мм,  $k_1 = 0,163$ ,  $k_2 = 0,144$ ,  $E_{eq} = 4056461$  кПа,  $h_{eq} = 0,212$  м

На Рисунке 10 для различных рассматриваемых случаев учета нелинейной работы железобетона представлены графики зависимости относительных неравномерностей осадок схем зданий от величины максимальной абсолютной осадки. Рассматривался диапазон абсолютных осадок здания, а также относительных неравномерностей осадок, не превышающий предельных значений, регламентированных СП 22.13330. Установлено, что расчетная неравномерность осадок будет существенно зависеть от выбранной методики моделирования работы железобетонных конструкций. Расчетам по рекомендациям норм соответствует значительно меньшая неравномерность осадок. Разница расчетной неравномерности осадок зданий в этих схемах по сравнению с расчетом с использованием нелинейной деформационной модели железобетона увеличивается с ростом податливости основания и достигает по мере приближения к предельным осадкам 30 % и 50 % при использовании рекомендаций соответственно СП 430.1325800 и СП 63.13330. Данные различия могут оказаться весьма существенными и повлиять на проектные решения по устройству конструкций, например, потребуют увеличения длины свай для снижения осадки здания, увеличения жесткости надземных конструкций.

Помимо неравномерности осадок учет нелинейности работы железобетона влияет на эпюру давления по контакту здания с основанием, на абсолютные значения осадок, а также на усилия в горизонтальных конструкциях. Эти значения отличаются от значений, полученных по результатам решения более жестких схем с использованием упругой модели железобетона по рекомендациям норм.

При использовании разработанной методики расчетные величины относительных неравномерностей осадок близки к значениям, полученным нелинейным расчетом. По результатам расчетов разница не превысила 5 % (см. Рисунок 10). Аналогичные выводы можно сделать для расчетов распределения нагрузок в конструкциях здания. Преимущество такой методики расчета по сравнению с нелинейной деформационной моделью заключается в существенном сокращении времени расчета за счет исключения

интегрирования напряжений по сечению элемента, необходимого при использовании нелинейной деформационной модели железобетона.

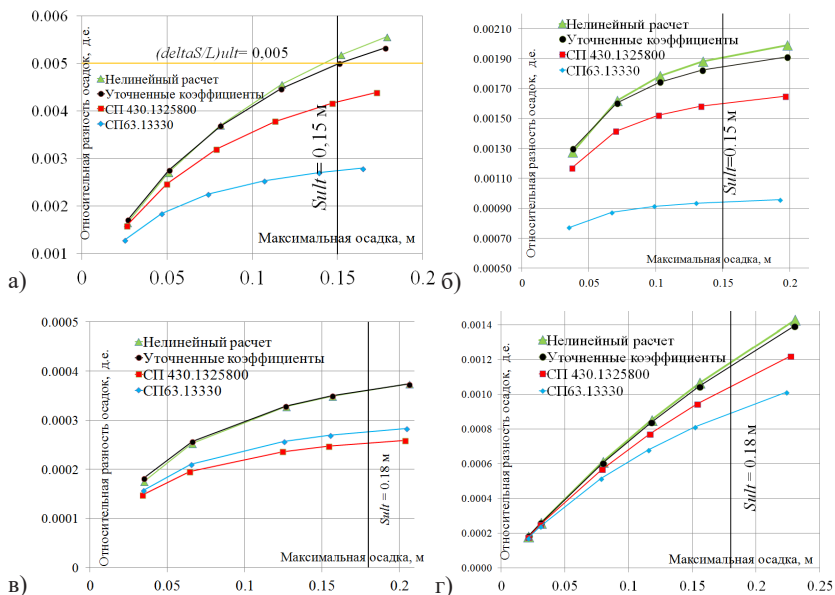


Рисунок 10 – Зависимости относительных неравномерностей осадок расчетной схемы от величины максимальной абсолютной осадки (м) по результатам расчета с использованием различных моделей работы железобетона: а) – плита 400 мм, б) – плита 600 мм, в) – шестизэтажное здание, г) – одноэтажное здание

В случаях развития сверхнормативных деформаций здания возможны значительные несоответствия в результатах расчета с использованием физически нелинейной и упругой модели работы железобетонных конструкций. Для подобных расчетов особенно важен учет перераспределения усилий за счет нелинейной работы железобетона. Такой случай рассмотрен на примере здания, построенного в г. Санкт-Петербург и испытывающего сверхнормативные неравномерные деформации сложного характера (см. Рисунок 11). Наряду с общим изгибом отмечается неравномерный крен по длине здания.

Расчеты НДС здания производились для первых трех схем работы железобетона (см. п. 3), принятых при расчетах модельных задач. Разработанная методика по упрощенной оценке изгибной жесткости здания не применялась в данном расчете, поскольку она предназначена для случаев оценки изгибной жесткости схемы при проектировании зданий и сооружений, когда неравномерные деформации здания находятся в пределах нормативных значений.

Результаты упругого и нелинейного расчета здания в зоне наиболее нагруженного простенка первого этажа (на Рисунке 11 отмечен кругом) приведены на Рисунке 12. По результатам нелинейного расчета концентрация напряжений на крайних участках стен оказывается меньшей по сравнению с упругими расчетами в соответствии с рекомендациями норм. При этом, в связи с недооценкой ползучести и пластических деформаций бетона, наибольшая разница в значениях вертикальных напряжений по сравнению с нелинейным расчетом соответствует схеме расчета с использованием коэффициентов по СП 430.1325800 и составляет до 35 %. Разница в значениях вертикальных напряжений в сечениях стен, полученных по нелинейному расчету и упругому расчету с назначением жесткости по СП 63.13330, составила 14 %.

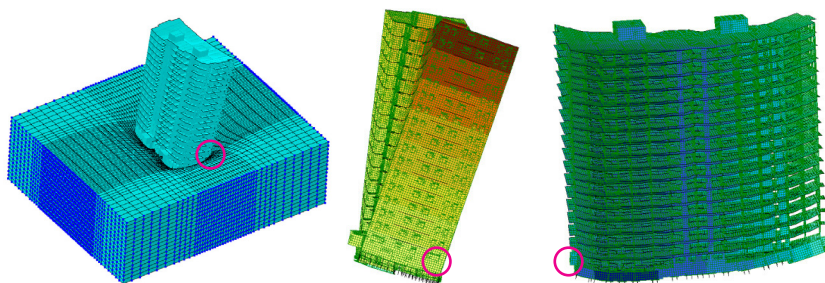


Рисунок 11 – Деформированная схема в ПК «Лира-САПР»

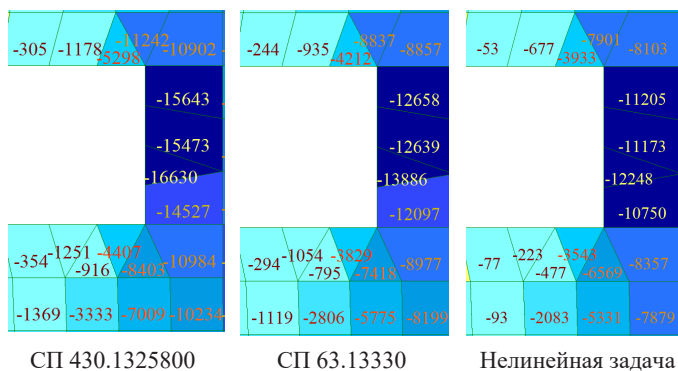


Рисунок 12 – Фрагмент расчетной схемы. Простенок первого этажа, вертикальные напряжения в стенах по результатам решения различных схем, кПа

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. По результатам расчетного анализа, проведенного в работе, в рекомендациях отечественных и зарубежных норм выявлены существенные несоответствия понижающих коэффициентов жесткости расчетному снижению жесткости железобетонных конструкций, определенному с использованием нелинейной деформационной модели железобетона.

Эти несоответствия ведут к завышению жесткости конструкций из-за недоучета основных факторов нелинейной работы железобетонных конструкций – трещинообразования, ползучести, пластических деформаций бетона. В общем случае расчета здания с учетом взаимодействия с деформируемой средой, напряженно-деформированное состояние схемы будет зависеть от жесткости здания и основания. Таким образом, в случае подобных расчетов требуется правильно назначить жесткость конструкций здания. Однако основная предпосылка использования коэффициентов, предложенных в рекомендациях норм, заключается в том, что распределение усилий в расчетной схеме здания зависит от соотношения жесткостей элементов его системы, а не от их абсолютного значения. Данный подход будет справедлив только в частном случае расчета схемы здания на неподатливых опорах либо основания в виде не связанных между собой податливых связей. Следовательно, использование указанных в нормах величин понижающих коэффициентов жесткости железобетонных конструкций будет некорректным в расчетах, учитывающих взаимодействие здания и основания в виде деформируемого полупространства.

2. На основании аппроксимации результатов расчетов с использованием нелинейной деформационной модели предложены формулы (1), (2) для определения величин коэффициентов снижения жесткости сечения железобетонного элемента на изгиб и продольное усилие после трещинообразования при длительном действии нагрузки, как функций от основных параметров железобетонного сечения. Результаты расчетов прогибов железобетонного элемента с использованием формулы (1) соответствуют результатам нелинейных расчетов и натуральных экспериментов.

3. На основании серии численных расчетов системы «основание – фундамент – здание» для модельных задач и существующего объекта было установлено, что при расчетах здания на деформируемом полупространстве физически нелинейная работа железобетона оказывает значительное влияние на деформации и на усилия в конструкциях здания. Следование указаниям норм приводит к большей жесткости здания по сравнению с нелинейным расчетом. Разница в оценке изгибающего момента в сечении здания между нелинейным и упругими расчетами с нормативными понижающими коэффициентами при задании различной кривизны сечению здания составила 37 %

при расчете по СП 430.1325800 и 119 % при расчете по СП 63.13330, а разница в оценке расчетной неравномерности осадок зданий между этими расчетами увеличивается с ростом податливости основания и достигает соответственно 30 % и 50 %. Данные различия весьма существенны при проектировании конструкций здания.

4. Разработана методика квазиупругого расчета железобетонных конструкций, позволяющая учесть снижение жесткости здания за счет физически нелинейной работы железобетонных конструкций, которая предназначена для использования в совместных расчетах здания и основания, и предполагает использование понижающих коэффициентов жесткости, определенных по предложенным формулам (1) и (2). Жесткость здания, определенная с использованием предложенной методики, позволяет получить результаты расчетов деформаций и усилий в конструкциях, близкие к результатам расчета с использованием нелинейной деформационной модели железобетона. Результаты расчета изгибной жесткости сечения здания и относительных неравномерностей осадок по предложенной методике хорошо согласуются с результатами по нелинейной деформационной модели, расхождения в результатах расчетов по серии выполненных численных экспериментов не превышают 5 %. Это свидетельствует о допустимости использования разработанных рекомендаций для анализа НДС расчетной схемы «здание – основание».

## **IV. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ**

### **Статьи, опубликованные в научных журналах, входящих в Перечень ВАК Минобрнауки РФ:**

1. Евсеев, Н. А. Учет физической нелинейности железобетона при численных расчетах конструктивных систем / Н. А. Евсеев, // Вестник гражданских инженеров СПбГАСУ. – 2017. – №5 (64). – С. 66–70. (0,31 п.л.)

2. Евсеев, Н. А. Анализ результатов численного расчета сложной конструктивной схемы с учетом физической нелинейности железобетона / Н. А. Евсеев // Промышленное и гражданское строительство. – 2017. – №12. – С. 44–52. (0,56 п.л.)

3. Евсеев, Н. А. Назначение жесткостных параметров железобетонных конструкций в конечно-элементных динамических расчетах сооружений / Н. А. Евсеев, В. В. Бабанов // Жилищное строительство. – 2017. – № 12. – С. 26–29. (0,25 п.л. / 0,125 п.л.)

4. Евсеев, Н. А. Особенности учета нелинейной работы железобетона в расчетах взаимодействия здания и основания / Н. А. Евсеев // Геотехника. – 2018. – №4. – С. 58–69. (0,75 п.л.)

5. Евсеев, Н. А. Метод расчета зданий из монолитного железобетона во взаимодействии с основанием при учете физически нелинейной работы железобетонных конструкций / Н. А. Евсеев // Жилищное строительство. – 2019. – №11. – С. 41–46. (0,375 п.л.)

6. Евсеев, Н. А. Ретроспективный анализ геотехнической ситуации при диагностике причин развития аварийных деформаций конструкций стадиона / В. А. Шашкин, Н. А. Евсеев // Жилищное строительство. – 2019. – №11. – С. 11–19. (0,563 п.л. / 0,281 п.л.)

7. Евсеев, Н. А. Обеспечение безопасности основания сооружений Снеогогорского монастыря / И. Л. Плечкова, А. Г. Шашкин, К. Г. Шашкин, В. А. Шашкин, Н. А. Евсеев // Геотехника. – 2020. – №2. – С. 52–66. (0,938 п.л. / 0,188 п.л.)

### **Публикации, индексируемые в международной базе данных Scopus:**

8. Evseev, N.A., Vasenin, V.A. Effective stiffness for modeling reinforced concrete structures in soil-structure interaction calculation. *Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction: New Materials, Structures, Technologies and Calculations. Proceedings of the International Conference on Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction: New Materials, Structures, Technologies and Calculations «GFAC 2019»*. – Saint-Petersburg. – 2019. – Vol. 2. – P. 396–401. (0,375 п.л. / 0,188 п.л.)

### **Статьи, опубликованные в прочих изданиях:**

9. Евсеев, Н. А. Учет физической нелинейности железобетонных конструкций при расчете взаимодействия здания и основания / Н. А. Евсеев // Инженерно-геотехнические изыскания, проектирование и строительство оснований, фундаментов и подземных сооружений. Сборник трудов Всероссийской научно-технической конференции. – СПб.: СПбГАСУ, 2017. – С. 106–109. (0,25 п.л.)

---

Компьютерная верстка *М. В. Смирновой*

Подписано к печати 29.03.2021. Формат 60×84  $\frac{1}{16}$ . Бум. офсетная.

Усл. печ. л. 1,5. Тираж 120 экз. Заказ 12.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.

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

Отпечатано на МФУ. 198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А.