

РЕЦЕНЗИЯ

на дисертационен труд за получаване на научна степен
“доктор ”
по научната специалност 01.02.03
”Строителна механика, Съпротивление на материалите”

Автор на дисертационния труд:
ас. инж. Анита Костадинова Хандрулева
от катедра: „Механика и математика” при ВСУ „Любен Каравелов”, гр. София.
Тема на дисертационния труд:

„Линейни и нелинейни изчислителни модели на пространствени прътови конструкции”

Научни ръководители: **1. проф. д-т.н. инж. Константин Савков Казаков;**
2. проф. д-р инж. Банко Петков Банков

Рецензент: **проф. д-р инж. Дончо Наумов Партов,**

р-л катедра “Механика и математика” при ВСУ ”Любен Каравелов”, София

Рецензията е изготвена съгласно заповед № 1424/11.12.2013 год. на Ректора на ВСУ „Л. Каравелов”, относно назначаване на рецензенти за защита на дисертация за придобиване на образователна и научна степен „доктор”, издадена на основание решение на ФС на СФ, взето с протокол № 9/21.11.2013 год. и решение от заседанието на научното жури за придобиване на научна степен „доктор”, взето с протокол №1/26.11.2013 год., свикано въз основа на чл.38 и 39 от Правилника за развитие на академичния състав във ВСУ „Л. Каравелов”.

1. Общи данни за авторката на дисертационния труд

Ас. инж. Анита Костадинова Хандрулева завършва висшето си образование по строително инженерство във Висшето строително училище „Любен Каравелов” – гр. София 2007 год, като придобива квалификация - ОКС: „бакалавър”, специалност: „Строителство на сгради и съоръжения”, професионална квалификация: **строителен инженер**; Диплома серия ВСУ-2007, № 071844, регистрационен № 01385/2007 г. През 2009 год. във Висшето строително училище „Любен Каравелов” – гр. София 2009 год., **ас. инж. Анита Костадинова Хандрулева** придобива квалификация - ОКС: „магистър”, специалност: „Строителство на сгради и съоръжения”, специализация: „Строителни конструкции”, професионална квалификация: **строителен инженер – конструктор** с Диплома серия ВСУ-2009, № 072009, регистрационен № 01547/2009 г. От април 2008 год. до ноември 2008 год. заема длъжност хоноруван асистент към катедра „Механика”, при ВСУ „Л. Каравелов”, като основните дейности, които изпълнява, са воденето на упражненията по дисциплината: “Теория на

еластичността, устойчивост и динамика на строителните конструкции”, специалност ССС, ОКС: „бакалавър”. От ноември 2008 до сега заема длъжност редовен асистент към катедра „Механика”, при ВСУ „Л. Каравелов”, като основните дейности, които изпълнява, са воденето на упражнения по учебните дисциплини: “Строителна механика I част”, специалност ССС, ОКС: „професионален бакалавър”; “Строителна механика I част”, специалност Архитектура, ОКС: „магистър”; “Строителна механика II част”, специалност Архитектура, ОКС: „магистър”; “Строителна механика I част”, специалност САСС, ОКС: „бакалавър”; “Строителна механика II част”, специалност САСС, ОКС: „бакалавър”; “Теория на еластичността, устойчивост и динамика на строителните конструкции”, специалност ССС, ОКС: „бакалавър”; „Метод на крайните елементи в строителната механика”, ОКС: „магистър”, специализация: „Строителни конструкции”. На 01.03.2010 год. с протокол на ФС на СФ № 8/10.02.2010 год. **ас. инж. Анита Костадинова Хандрулева** е зачислена в задочна докторантура по научната специалност: 01.02.03 „Строителна механика, Съпротивление на материалите”. Отчислена е с право на защита на 22.07.2013 год. с протокол на ФС на СФ: № 5/22.07.2013 год. От март 2010 год. до 2012 год. **ас. инж. Анита Костадинова Хандрулева** работи като младши проектант в фирмата ИРКОН ООД, където се занимава с проектиране на строителни конструкции.

2. Актуалност, значимост и област на приложение на дисертационния труд

Разработеният в дисертацията проблем е извънредно актуален в теоретично и приложно отношение. Изследването на **пространствени прътови конструкции** от стомана, с цел определянето на тяхното напрегнато и деформирано състояние при въздействия от външни статически и динамични въздействия, като: собствено тегло, температура, вятър и земетръс, в последните десетилетия представлява една бурно развиваща се област, в чиито граници специалистите по строителна механика се сблъскват със сериозни задачи при изчисляване на редица конструкции и съоръжения от типа на: кули, мачти, пространствени покривни конструкции, спортни зали, хеликоптерни площадки, сводови и цилиндрични стоманени конструкции за складови площи и не на последно място огромни зални пространства за атомни централи, топлоцентрали, хангари за самолетната индустрия, а така също и за най-различни обекти на гражданската инфраструктура - покрития на метростанции и олимпийски стадиони. (Справка: Symposium: IABSE-IASS, ”Taller, Longer, Lighter”, September, London, 2011; Symposium: IABSE - ”Large Structures and Infrastructures for Environmentally Constrained and Urbanised Areas”, Venice, Italy, September, 2010; Symposium: IASS, ”New Shell and Spatial Structures”, Beijing, China, 2006; Journal of the IABSE- SEI, Vol. 1-84, 1929-2013; Journal of the IASS, Vol. 1-54, 1959-2013). На основание горе изложеното дотук става ясно, **че за решаването на формулираната задача ще бъдат използвани задълбочени познания, както в областта на строителната механика**, така също и във владенето на редица известни програмни продукти, които отдавна представляват основни приоритети в научното израстване на докторантката.

Стоманените пространствени прътови конструкции представляват сериозен дял и от изпълнените у нас широкоплощни сгради и се отличават с широкото си приложение в почти всички отрасли на националната ни икономика. Тяхното механо-математическо моделиране и провеждане на по-точни статически и динамични изчисления с помощта на

съвременни изчислителни програмни продукти, води до по-реално отчитане на напрегнатото и деформираното им състояние, което от своя страна способства за определяне на остатъчния ресурс на тези конструкции в периода на тяхната експлоатация, а така също и за условията при които тя трябва да протече.

3. Информированост за състоянието на проблема

Предложената за рецензиране докторска работа на ас. инж. Анита Костадинова Хандрулева е изготвена в два тома. **Първият том съдържа основната теоретична и изчислителна част на дисертацията, обхващаща 299 страници, текст - формат А4.** В обхвата на дисертационния труд са включени общо 217 фигури и 112 таблици, както и разписани 100 формули. В глава 2 на стр. 72-99 са **представени множество графики и таблици, илюстриращи резултатите от изследванията** на докторантката върху измененията на нормалните усилия и възлови премествания в избраните представителни елементи от дискретните сферични куполи. В същата глава на стр. 106-124 са представени екранни образи и таблици, илюстриращи получените изчислителни резултати от изследването на напрегнатото и деформирано състояние на дискретни сферични куполи. В глава 3 на стр.126-152 са илюстрирани върху достатъчен брой екранни образи на сферични куполи, различни повърхнини на влияние. В глава 4 на стр. 159-160, 169-173, 177-178, 182-198 са показани илюстративно, **чрез прецизно моделирани схеми и фигури**, етапите, през които преминава последователното изключване на прътите, при загубата на устойчивост на сферични куполи. В същата глава са илюстрирани на стр. 202-211 върху достатъчно на брой схеми на структурни конструкции механизмите им на разрушение при стъпково увеличаване на вертикалното натоварване. В глава 5 на стр. 223-227, 234-238, 251-255 са илюстрирани **върху интересни екранни образи формите на трептения на различни изчислителни схеми на сферични куполи и двуслойни структури**, получени при техния модален анализ. **Вторият том представлява едно великолепно приложение към дисертацията, разгънато в три приложения.** В първото приложение (стр. 1-85) са описани множество пространствени конструкции, илюстрирани с богат снимков и графичен материал, изпълнени от дърво, стомана и мембрани, **голяма част от които представляват световни образци в тази област.** Във второто приложение (стр. 86-161) са дадени в подробен табличен вид резултатите от изследванията на докторантката върху повърхнините на влияние на дискретни прътови сферични куполи. В третото приложение (стр. 162-281) са резултатите от анализа на еднослойни дискретни сферични куполи подложени на сеизмично въздействие, илюстрирани чрез множество прецизно подготвени схеми. В представения от докторантката списък на ползвани литературни източници са представени общо **232 заглавия, от които 60 на кирилица и 172 на латиница.** Списъкът съдържа заглавия на класически трудове от областта на строителната механика; **трудовете посветени на развитието на математическите, физически и технически принципи** на метода на крайните елементи; трудове посветени на теориите **на изчисляване на прътови мрежести черупки и равнинни двуслойни структури**; трудове посветени на изчислителни модели на взаимодействие на строителна конструкция и земна основа; трудове посветени на численото моделиране на различни задачи от строителната механика и динамика с крайни елементи. Преобладаващият брой цитирани трудове са от последните 25 години на миналото столетие, като 68 труда от тях са

публикувани след 2000 год., което е гаранция, че авторката познава работите на редица съвременни учени, работили по избраната в дисертацията проблематика. **Прекрасно впечатление прави подробното представяне на постиженията на включените в литературните източници имена на световно известните учени в областта на изследването на пространствените прътови конструкции, а именно:** F. Lederer, J. Brodka, Z. Kowal, M. Lubinski, A. Grudka, D. Dubina, M. Vašek, S. Kato, M. Yamada, N. Morris, R. Malla, A. El-Sheikh, V. Gioncu, C. Borri, J. Sumec, И. Трофимов, А. Трущев, Е. Липницкий, а така също и имената на авторите: Bathe, K. J.; Wilson, E. L., Belytschko, T.; Clough, R. W.; Gallagher, R. H.; Hughes, T. J. R.; Zienkiewicz, O. C.; Taylor, R. L. и др. Тези имена дават достатъчно основание да се предположи, **че предлаганата разработка ще бъде в пълно съзвучие с най-добрите традиции в областта на МКЕ.** Освен това включените в проучването автори, разработили част от формулираната проблематика на пространствените конструкции, **гарантират достатъчна осведоменост по въпроса,** което предполага изключване на евентуални дублирания в разработването на проблема. Изключително добро впечатление прави включените в проучването обекти с пространствени конструкции, имената на именитите български инженери: ст.н.с. I ст. инж. Дочо Дочев от НИСИ и ст.н.с. II ст. Румен Младжов, който в момента работи САЩ- Сан Франциско и сътрудничи на арх. Норман Фостер, при изграждането на учебните корпуси на Станфордския Университет.

4. Анализ на представения дисертационен труд

4.1. Общи данни

В докторската работа се **разглеждат седем актуални задачи** от областта на изчислителните модели на пространствени прътови конструкции, а именно: **1.** Установяване влиянието на вида на решетката при минимизиране на усилията в меридианни, поясни и диагонални пръти, и възловите преместванията при изменение на централния полуъгъл α ; **2.** Оптимизиране теглата на куполите във функция на централния полуъгъл α при фиксиран тип решетка; **3.** Построяване повърхнини на влияние за типови пръти от решетката на различни куполи и формулиране на оценъчно-количествени показатели за изменението на усилията в тях при различна конфигурация на структурната решетка; **4.** Извършване на стабилитетно изследване чрез използване на повърхнините на влияние за получаване на локални механизми на разрушение. Изследване на граничното състояние на прътови куполи при изключване на пръти, изчерпили носимоспособността си; **5.** Провеждане на динамично изследване на прътови куполи. Определяне на собствени честоти, периоди и форми на трептене при различни типове решетка и подпиране на опорния пръстен. Извършване на модални и спектрални анализи, при обобщени динамични характеристики; **6.** Изследване устойчивостта на различни модели на структурни конструкции в зависимост от начина на подпиране. Моделиране чрез изключване на пръти, изчерпили носимоспособността си и използване на повърхнини на влияние за съсредоточаване на външното натоварване; **7.** Провеждане на динамично изследване на различни модели на структурни конструкции. Определяне собствените честоти, периоди и форми на трептене при различни начина на подпиране. Извършване на модални и спектрални анализи, при обобщени динамични характеристики.

4.2. Структура на дисертацията

Дисертационната работа е структурирана в **пет глави**. **Глава 1** ни въвежда в темата и съдържа литературния обзор на проблема. В нея са обобщени и целите на дисертацията. В **глава 2** е изследвано напрегнатото и деформирано състояние на прътови еднослойни сферични куполи при статично натоварване. Въведен е нов параметър, който е означен като "линейна напрегнатост". Освен това, в тази глава е изследвано напрегнатото и деформирано състояние на прътови сферични куполи, подложени на несиметрично вертикално натоварване. **Глава 3** ни запознава с методите на построяване и изследване на повърхнини на влияние за нормални усилия в избрани пръти от дискретни сферични куполи. В **глава 4** са показани изследванията на няколко еднослойни дискретни сферични куполи и структурни конструкции в гранично състояние. Построени са комбинирани механизми на разрушение при едновременно отчитане на загуба на устойчивост в натиснати пръти и изчерпване на якостната носимоспособност в опънати пръти. Всяка една глава съдържа анализ на резултатите и произтичащите от това изводи и заключения. В **глава 5** е изследвано динамичното реагиране на еднослойни дискретни сферични куполи и структурни конструкции. **В края на дисертацията** са описани основните изводи и заключения от проведените изследвания, както и са формулирани претенциите за научни и научно-приложни приноси на автора, насоки за бъдещи изследвания, използвана литература и благодарности. Библиографията обхваща 232 заглавия, от които 60 на кирилица и 172 на латиница. Дисертацията завършва с описание на публикациите, свързани с темата на разработката и декларация за самостоятелност. Част от работата, където основно са публикувани числови масиви от резултати при проведените изследвания, са представени като приложение. Във всичките случаи са разглеждани примери с конструктивни елементи, изпълнени от стомана.

4.3. Констатации по Глава 1 (стр. 9-67): Извършен е обстоен исторически преглед на развитието на пространствените прътови конструкции по света и у нас. Най напред са разгледани основните видове структурни конструкции прилагани в практиката. **Извършен е сполучлив коментар** върху избора на основните параметри на структурните конструкции, които се определят при проектирането им именно: видът на поясните мрежи и тяхното взаимно разположение, конструктивната височина на решетъчната плоча и размерите на поясните клетки. Показани са различните начини на подпиране на структурите. Осветлени са различните методи и модели на тяхното изчисляване. **Специално внимание е отделено на факторите и явленията**, оказващи влияние на стабилитетното поведение върху структурите, както **по отношение на отделните им елементи**: нецентрично натоварване, стройност, геометрични отклонения, податливост на възловите съединения в двата края, влияние от преразпределяне на усилията, вследствие на един или няколко дефектирали пръта (загубили своята носимоспособност), следкритично поведение; **по отношение на цялата конструкция**: вид и гъстота на решетката в структурната плоча, геометрични отклонения и физическа нелинейност, поддаване на опори, локална повреда или загуба на пръти, поведение на възловите съединения, начин на подпиране, наличие на корав подов или покривен диск, **така и по отношение на натоварването**: статично симетрично или несиметрично, шахматно, динамично натоварване от окачени подвижни товари (напр. електротелфери, вентилатори и

др. вибрационни машини), земетръсно и ветрово въздействие, температурни промени. За определяне на граничната носимоспособност на пространствените структурни конструкции докторантката разграничава и подробно описва два вида гранични състояния: **експлоатационен граничен товар**, при който конструкцията все още изпълнява своето функционално предназначение и **разрушителен граничен товар**, който причинява разрушение на цялата конструкция. **След грабването на вниманието на читателя с обстойната информация за пространствените структури**, докторантката се впуска в още по-интересна област на пространствените конструкции, третираща проблемите на куполните системи. Разгледани са основните видове пространствени прътови куполни системи (ребрести и решетъчни), използвани за покрития на обществени, културни и спортни зали с големи диаметри на основата. Обяснени са факторите, влияещи върху напрегнатото и деформирано състояние. Коментирани са изчислителните модели и изчислителни проблеми при този вид конструкции. Представено е приблизително изчисляване на ребрести куполи, като идеализирана равнинна дъга с условни обтегачи на нивото на поясните пръстени. Показано е приблизително изчисляване на решетъчни куполи с триъгълна структурна решетка, чрез определяне на еквивалентни физически характеристики. **Обстойно са осветени проблемите свързани с изследване устойчивостта на куполите, като са разгледани различни видове неустойчиви форми при еднослойни куполи.** Подробно е изяснено определянето на критичния параметър на натоварване, за чието изчисляване се използват трите теории за равновесните състояния, а именно: теориите от първи, втори и трети редове. Изяснени са изчислителните процедури за решаване на нелинейните алгебрични уравнения, в основата на които лежат модифицирания метод на Нютон и метода на Нютон-Рафсон. **Анализирани са формули, (съставени от различни автори), за определяне на критичното натоварване за прътови куполи с регулярна триъгълна решетка.** Специално внимание е отделено на динамичното поведение на пространствените конструкции в светлината на модален и спектрален анализи и Еврокод 8.

4.4. Констатации по Глава 2 (стр. 68-125): В тази глава е извършено едно интересно за практиката параметрично изследване на напрегнатото и деформирано състояние на еднослойни дискретни сферични куполи при ососиметрично статично натоварване. **Като обекти на изследване са разгледани седемдесет модела на куполи.** Изчислителните модели се различават по вида на граничните опорни условия, структурната решетка и височината им (във функция на централния полуъгъл и радиуса на сферичната повърхност). Те са групирани в два типа изчислителни модели (според вида на граничните опорни условия), а всеки тип съдържа съответно по пет варианта (според морфологията на структурната решетка). От своя страна всеки вариант има по седем представители (в зависимост от височината). За конструктивните елементите от структурната решетка са приети напречни сечения от тръбни профили. За всички елементи на разглежданите куполи са приети еднакви геометрични характеристики на напречните сечения. При генерирането на изчислителните модели са приети следните фиксирани параметри: диаметър на основата $D=30m$; диаметър на ключовия пръстен $d_k=1,65m$; цикличен ъгъл при основата $\beta=15^\circ$; брой на паралелите, разделящи меридианните линии (вътрешни пръстени) $n=7$; корава връзка на

елементите с опорния пръстен; корава връзка между елементите от структурната решетката. Вертикалното натоварване е с интензитет $q = 5,0 \text{ kN/m}^2$. **Проведено е параметрично изследване чрез серия числени опити върху разработените прътови куполи** с постоянен радиус на основата $r_0 = 15,0 \text{ m}$ и нарастваща височина, отговаряща на централен полуъгъл α , изменящ се в интервала от 30° до 90° със стъпка 10° . Численото сравнение на резултатите е направено по следните признаци: изменение на нормалните усилия в прътите от решетката; местоположение на неутралната линия, разделяща натискови и опънни усилия в пръстените на куполите; вертикално преместване на характерни възли. Диаграмите за изменение на усилията в избраните представителни елементи **показват обща тенденция на нелинейното им намаляване** с нарастване на централния полуъгъл α . Типът на решетката се отразява в кривите, които съответстват на различни нормални усилия в пръстените от I-во и II-ро поясно ниво за всяка фиксирана стойност на α . **Интересен е феноменът, че с нарастване на α от 30° до 50° се забелязва, че натисковото усилие в I-ви поясен пръстен преминава в опънно.** Тази промяна на знака в усилието се наблюдава и във втория вътрешен пръстен в интервала $\alpha = 60^\circ \div 70^\circ$. Границата между натисковите и опънни пръстеновидни усилия се определя от "неутралната" линия. В подходящо построени фигури (фиг. II.43) са означени основните параметри на купола (R , H) и местоположението на неутралната линия: y – спрямо основата на купола и Y – спрямо центъра на сферичната повърхнина. Деформираното състояние, изразено чрез възловите премествания, е проследено чрез вертикалните им стойности в три представителни възела от куполите с еднакви координати, съответно от I^{-ви}, IV^{-ти} и ключов пръстен. Кривите на преместванията в тези възли са показани на съответните построени за тази цел: фиг. II.46, фиг. II.47 и фиг. II.48. Графиките от фиг. II.46 и фиг. II.47 показват нелинейно намаляващите вертикални премествания на избраните възли и съответно отразяват нарастващата коравината на системата във вертикално направление на съответното ниво с увеличаване на α . Резултатите от проведеното изследване в тази точка на дисертацията (I.1) показват следните тенденции: А) При увеличаване височината на купола, натисковите усилия в меридианите пръти намаляват, при което обаче се увеличават геометричните им дължини. Усилията в диагоналите и пръстените намаляват (с изключение на първия етажен пръстен, при който усилията нарастват); Б) При намаляване височината на купола, се наблюдава обратното явление, максималните натискови усилия нарастват, при което изключвателните дължини намаляват, а "неутралната" линия, разделяща натиснатите от опънатите поясни пръти, слиза надолу.

Горните изследвания са дали повод да се формулира допълнителна задача към дисертацията: При фиксиран радиус на основата на купола и при условно възлово натоварване **да се потърси оптималния централен полуъгъл α** , при който обемът (теглото) на материала, вложен в купола, да бъде минимален. **Задачата се решава чрез въвеждане от докторантката на нов по формулировка (за разлика от други съществуващи подходи), параметър, който се означава като "линейна напрегнатост" (виж. ф-ла II.8).** Чрез него се оптимизират теглата на сферичните прътови куполи с различни типове решетка при еднакъв основен диаметър и различни централни полуъгли, съответни на опорния паралел на купола. **Ефектът при използване на параметъра "линейна напрегнатост" (LN) е, че не е необходимо да се извършва реално статическо изчисляване и оразмеряване на прътите от куполната решетка.** Обект на изследване са еднослойните куполи с често използвани

традиционни решетки (виж.фиг.П.1). **Минимизацията на теглото на сферичните куполи** е извършена за площно натоварване с условна интензивност, което се привежда към съсредоточени възлови сили. Възловите връзки между прътите от куполите на фиг.П.1 са приети като корави, а подпирането върху основния пръстен-неподвижно. Освен това оптимизацията е извършена при вариране на дължините на прътите от решетката и усилията в тях, във функция на променящия се централен полуъгъл при постоянна условна интензивност на натоварването. Огъващите моменти, които се пораждат в коравите възли на прътите от фиг.П.1, по подразбиране, са пренебрегнати. **От изведените формули в тази част на дисертацията става ясно, че за да се минимизира теглото на купола G е достатъчно да се минимизира неговата "линейна напрегнатост"**. Поради това отпада необходимостта да се оразмеряват прътите и да се изчислява сумарното им тегло при всяка промяна на централния полуъгъл α . Може да се предвиди, че с увеличаване на куполната височина H , свързано с увеличаване на полуъгъла α , прътовите усилия N_i ще намаляват, **тъй като са функция от намаляващия хоризонтален отпор**, упражняван от опорния пръстен. За сметка на това се увеличават дължините l_i на прътите. Обратно, снижаването на купола при намаляване на централния полуъгъл α води до скъсяване на дължините l_i и увеличаване на прътовите усилия N_i . **Точно на пресечната "точка" на тези две противоположни тенденции съответства търсения оптимален от гледна точка на минимизиране на теглото централен полуъгъл α .**

В тази част от дисертацията е изследвано напрегнатото и деформирано състояние на дискретни сферични куполи, **подложени също така и на осонесиметрично вертикално натоварване** при радиално подвижни опори. Като обекти на изследване са разгледани четиридесет модела на дискретни куполи, за генерирането на които са използвани **frame** крайни елементи. Изчислителните модели се различават по вида на структурната решетка. Направена е и съпоставка с гладки непрекъснати куполи, като за целта са изградени три допълнителни модела. Споменатите куполи са генерирани с **shell** крайни елементи с различна размерност на дискретизационната мрежа. Съблюдавано е условието за еднаквост на преместването на приложната точка на силата, съпоставено с дискретните модели. Като основен параметър за съпоставка на изчислителните модели са избрани опорните реакции. Резултатите са представени в графичен и табличен вид. От съпоставяне на изчислителните резултати, могат да се направят следните изводи: коравата връзка между възлите от радиалните ферми и вътрешните разпределителни пръстени, (виж фиг.П.50 –1), 2)), води до съществено намаляване на опорната реакция на натоварената ферма и увеличаване на тези на съседните. Това се дължи се на наличието на огъващи моменти и напречна сила в прътите от споменатите пръстени; наличието на вертикални диагонални връзки, т.е. връзки свързващи възли от горен и долен пояс на две съседни радиални ферми, (виж фиг.П.50 – 4), 10), 11) и фиг.П.51 – 19), 20), 21)), силно преразпределя усилията във фермите и води до чувствително (двойно) намаляване на вертикалната опорна реакция в натоварената ферма и съществено увеличаване на тези на съседните. Наблюдаваното силно преразпределение е вследствие на осовата коравина на диагоналите. Добавянето на хоризонтални укрепващи връзки по горен пояс, т.е. връзки свързващи възли от горен пояс на две съседни радиални ферми, (виж фиг.П.50 –5), 12) и фиг.П.51 – 13), 14), 22), 23), 24)), води също до съществено намаляване на вертикалната опорна реакция в натоварената ферма и преразпределение в съседните. При

куполи от К.21 до К.24 е **налице известно засводяване в силовия поток**. Прътовата конфигурация на К.24 има опорни реакции близки до тези на непрекъснат купол с еквивалентна вертикална коравина в приложната точка на силата. **С цел по-доброто възприемане на дисертацията от нейните читатели и адекватното и тълкуване, тази глава би могла да бъде разширена с няколко схеми на възлови съединения прилагани в решетъчни куполи с цел да се видят хипотезите и пътищата за преминаване на усилията в техните меридианни и паралелни повърхнини.**

4.5. Констатации по Глава 3 (стр.126- 152): Тази глава е посветена на **един сериозен въпрос, свързан с повърхнините на влияние (ПВ) за усилие (опорна реакция, прътово усилие, момент, напречно или нормално усилие),** които при куполите представлява тримерната графика, която отразява изменението на тази величина, като функция от положението на подвижна съсредоточена сила с единична големина и постоянно направление, обхождаща “пътната” повърхнина. При плоските пространствени прътови системи тя представлява съвкупност от линии на влияние, построени за отделни взаимно ортогонални сечения през равни интервали върху площта на изследвания обект. При прътовите куполи тяхното построяване е свързано с преодоляването на някои затруднения, поради обстоятелството, че разстоянието между сеченията намаляват нагоре по меридиана, а геометричната област, върху която се строи ПВ е с двойна кривина и трябва да се намери “четлива” система за изобразяването и. **В дисертацията е намерена ефективна възможност за аксонометрично изобразяване на купола в поглед отпред,** като ординатите на повърхнината се нанасят вертикално. Понеже изчисляването на ординатите на повърхнината на влияние за определено разрезно усилие (РУ) или преместване за пространствените системи по ръчен способ е почти невъзможно, (поради високата им статическа неопределимост по метода на преместванията и метода на силите), са използвани за случая съвременни софтуерни програми по МКЕ (SAP2000, ANSYS и др.), за изчисляване ординатите на повърхнината на влияние за определено усилие. **За построяване на повърхнините на влияние е приложен принципът на Müller-Breslau (1886),** известен сред строителните инженери като кинематичен метод, чрез който: *повърхнината на влияние се определя като еластична повърхнина - диаграма на преместванията на точките от възлите на конструкцията, при отрицателно единично взаимно преместване или завъртане по направление на усилието, за което търсим ПВ.* **Основните цели и задачи, свързани с изследването на повърхнините на влияние са формулирани ясно и точно и с високи изисквания,** както следва: очертаване на зоните за получаване на екстремни (натискови и опънни) стойности за усилията в прътите от купола с различна морфология на структурната решетка под действие на товар, вертикален към сферичната повърхнина; определяне зоните на ПВ, в които натоварването не влияе съществено върху изследваното прътово усилие, което би довело до опростяване на процедурата за търсене на екстремни усилия; изясняване ролята на симетричен, несиметричен и локален товар върху състоянието на прътите; използване повърхнините на влияние за изследване на куполите в стадий на гранично равновесие (загуба на устойчивост) и при изследване на загуба на носимоспособност на елементите. Като обекти на изследване за построяване на повърхнини на влияние в пространствени прътови конструкции са разгледани пет представители. Куполите са условно означени съответно с

К.1÷К.5, показани на фиг.Ш.1. **Повърхнините на влияние дават ясна представа за приноса на определено натоварване върху крайната стойност на усилието в съответен елемент.** Лесно се определят зоните на натоварване с цел получаване на гранична стойност на нормалното усилие в елемент от решетката. Използването им дава възможност да се оценяват граничните стойности на търсените величини, чрез възможно разполагане на натоварване за всяка конкретна ситуация (случайна или извънредна) на външно въздействие. **От построените ПВ се забелязва, че най-голям принос върху нормалното усилие за разглеждан елемент оказва зоната в непосредствена близост до него.** С отдалечаване на приложните точки на силите се наблюдава затихване на влиянието, като този ефект е пространствен и зависи от коравината на структурната решетка. Очевидно, колкото ПВ е по-концентрирана в близка област около даден елемент (с бързо „затихване”), толкова по-корава е куполната система. **Важен извод от построените ПВ, е че по повърхнината на влияние може да се оцени коравината на системата.** Резултатите, получени в тази глава, са използвани в следващите глави при изследване на приетите типове куполни решетки в гранично състояние.

4.6. Констатации по Глава 4 (стр.153-212): Тази глава е посветена на изследването на устойчивост на еднослойни куполи и двуслойни пространствени конструкции.

4.6.1 Устойчивост на еднослойни куполи

При изследването в гранично състояние на решетките на куполите са отчетени някои техни особености в деформираното и напрегнато състояние: поради преобладаващите натискови усилия в прътите на купола и тяхната определяща роля за осигуряване на устойчивост и коравина уместно е прието, **че механизмите на разрушение се получават при изключване от работа на най-напрегнатите натискови пръти;** нецелесъобразно (практически невъзможно) е, поради големия брой пръти и възли, да се търсят независими механизми на разрушение при действие на параметрично нарастваща сила във всеки отделен възел, които да служат за получаване на съчетани механизми и съответно търсене на минимална стойност на критичния товарен параметър. При изследването са приети следните фиксирани параметри на купола: диаметър на основата $D=30m$; диаметър на ключовия пръстен $d_k=1,65m$; цикличен ъгъл при основата $\theta=15^\circ$; централен полуъгъл $\alpha=50^\circ$ и кореспондираща височина на купола $H=7m$; брой на паралелите, разделящи меридианните линии (вътрешни пръстени) $n=7$; корава връзка на елементите с опорния пръстен; корава връзка между елементите от структурната решетка. За конструктивните елементи са приети напречни сечения от тръбни профили, а именно: $\varnothing 83 \times 4$ с площ $A=9,93cm^2$, инерционен момент $I=77,64cm^4$ и инерционен радиус $i=2,8cm$. Профилите са от стомана $S235JRH$ по $EN 10219-2$ с изчислително съпротивление на стоманата $R_y=235MPa$. **В зависимост от дължините на прътите (L_i) от решетката и тяхната стройност (λ_i), за различните нива е определена граничната носимоспособност на натиск на елементите ($N_{cr,i}$), (виж табл.IV.1), съгласно Еврокод 3. За определяне критичната стойност на параметъра на натоварване е приложен съвременният подход за стъпково нарастване на товара с последователни приближения, до намиране на гранично равновесно състояние на системата. При достигане на гранична носимоспособност на натиск на даден елемент се приема, че той**

излиза от работа и при следващия изчислителен етап приносът му не се взема предвид. **Изследването е проведено в условията на геометрична нелинейност, с отчитане на $P-\Delta$ ефекта**, т.е. влияние на нормалните усилия върху коравината на системата, като се предполага, че преместванията нарастват след изключване на елементи от работа. **Условията за равновесие в случая са записани спрямо деформираното положение на структурата.** Численото решение е проведено с програмен продукт, базиран на Метода на крайните елементи, като са разгледани различни случаи на локални и несиметрични натоварвания, съобразени с построените повърхнини на влияние в предишната глава. Изследванията, проведени при шест отделни случая на натоварване, показват различни механизми на разрушение. В табличен вид (табл.4.2) са дадени граничните товари и броя на загубилите своята носимоспособност натиснати пръти. Доказано е, че най-неблагоприятният случай на натоварване е несиметричното му разположение върху купола. Граничният товар от симетричното локално разпределение има по-голяма стойност, което отразява значително по-голямата "симетрична" коравина в сравнение с поведението при несиметричното разположение на товара. При симетричен локален товар, излизат от работа натиснати елементи, непосредствено под приложения товар. Граничната стойност на товара намалява при несиметричното му разпределение върху по-голяма площ от купола, което води до излизане от работа на голям брой натиснати меридианни пръти в основата. Характерно за всички случаи на натоварване е "ефекта на доминото", при който с достигане на граничния товар започва прогресивно излизане (progressive colaps) от работа на все повече пръти. **Граничната графика (IV.7-str.161) наподобява диаграмата на еласто-пластично тяло.** Поради значителния брой на независими възлови параметри и елементи, при представяне поведението на купола се използват конститутивни зависимости между възлови премествания в характерни възли и опорни реакции или прътови усилия. **По този начин, достатъчно задълбочено се разкрива етапът, при който коравината на системата се е изчерпила и това поражда нарастване на преместванията.** Графиките на поведение на купола, изразени със зависимостта сила-преместване в избраните възли, показват понижаване на огъвната коравина при проведеното стъпково натоварване. Резултатите, систематизирани в табл.IV.6 от тази глава показват, че изследването на граничното равновесие чрез "комбинирани" механизми, отчитайки последователно изчерпване на носимоспособността както на натиснати, така и на опънати пръти, е в полза на сигурността. От проведените изследвания за разгледаните случаи на натоварване на купола произтичат следните изводи, **които са с висока, научно-приложна стойност:** 1) Характерна е еласто-пластична работа на куполите; 2) При достигане на гранична стойност на натоварването е налице прогресивно разрушение; 3) Граничният товар е най-малък при несиметрично натоварване; при локално натоварени участъци с малка площ се наблюдава локално разрушение при по-голяма стойност на граничното натоварване; локално приложени товари пораждат местно (локално) измятане или „хлътване” на купола; с увеличаване на площта на натоварване, стойността на граничния товар намалява; 4) Излизане от строя на пръти и последващо разрушение се наблюдава в зоната около локалното натоварване или натоварена зона от повърхнината на влияние, пораждаща екстремна стойност на усилията в прътите; налице са локално разрушени участъци или пълно разрушение; 5) Наред със следене на преместванията и проявените деформации на купола трябва да се проследяват измененията на нормалните усилия в

изграждащите конструктивни пръти и да се проверят дали те не превишават граничната прътова носимоспособност на натиск и опън.

При констатиране на такова явление е възможна проява на изключване на пръти или работа на елементи с намалена носимоспособност, което може да доведе до понижаване стойността на критичния товар. Подходът за изследване чрез изключване на пръти от работа може да се каже, че е все пак приблизителен, поради необходимостта от предварително уточнена схема за работата на прътите, т.е. даден прът работи до момента, в който неговата носеща способност се изчерпи. Това дава възможност след изчерпване на носимоспособност на прът или група пръти да се проследят броя на прътите, в които се пораждат допълнителните нормални усилия. По този начин може да се оценят застрашените конструктивни пръти от претоварване и да се вземат необходимите конструктивни мерки за предотвратяване на разрушение. **Разбира се, при използване на подхода на изследване с отчитане не само на геометричната, но и на физическата нелинейност се получава поточна картина на поведението.** Възможностите при използването на подходящ софтуерен продукт (напр. ANSYS), позволяват посредством нелинейно решаване да се отчете следкритичния принос на пръта в работата на вътрешните сили, т.е. дадения прът продължава да работи с намалени остатъчни вътрешни усилия. **Стойностите на граничния възлов товар, определени при първия подход, за отбелязване е, че са в полза на сигурността.**

4.6.2 Устойчивост на двуслойни структури

Така както и при куполите, **изследването на устойчивото поведение** на двуслойни прътови конструкции е също така неизменна част от тяхното проектиране, изчисляване и оразмеряване. Осигуряването на тяхната стабилност и надеждност е предхождано от провеждане на многобройни изследвания и експериментални изпитвания от учени по цял свят. Причина за това е големия брой случаи на разрушени структурни конструкции, вследствие на загуба на устойчивост от товар, значително по-малък от критичния за системата. Както при куполите, основните фактори, влияещи върху стабилитетното поведение са: морфология на структурната решетка, геометрични и материални характеристики на конструктивните елементи, вид на възловите съединения и начина на подпиране. Факторите и явленията, влияещи върху стабилитетното поведение, както на отделния елемент, така и на цялата конструкция, са представени както следва: нецентрично натоварване, стройност, геометрични отклонения, податливост на възловите съединения в двата края, влияние от преразпределяне на усилията, вследствие на един или няколко дефектирали пръта (загубили своята носимоспособност), следкритично поведение; вид и гъстота на структурната плоча, геометрични отклонения и физическа нелинейност, подаване на опори, локална повреда или загуба на пръти, поведение на възловите съединения, начин на подпиране, наличие на корав подов или покривен диск; статично симетрично или несиметрично, шахматно, динамично натоварване от окачени подвижни товари, вентилатори и други вибрационни машини, земетръсно и ветрово въздействие, температурни промени.

За изследване на структурни конструкции в гранично състояние, са разработени четири пространствено-прътови изчислителни модела (виж фиг.IV.48). Приета е ортогонална в план прътова покривна конструкция с размери на структурната клетка $3/3m$,

съгласно типовата разработка ППК,84–МархИ на КНИПИАТ-ГЛАВПРОЕКТ. Прътовите елементи са изпълнени от тръбни профили, а именно: горни и долни пояси - $\varnothing 95 \times 4 \text{mm}$; диагонали - $\varnothing 73 \times 3,5 \text{mm}$; пространствени прътови капители (модел С.1) - $\varnothing 114 \times 4,5 \text{mm}$; капител модел С.2 – НЕВ500; колони на модели С.1 и С.2 - $\varnothing 560 \times 10 \text{mm}$; колони на модели С.3 и С.4 - $\varnothing 219 \times 5 \text{mm}$. Тук е мястото да се каже, че при разработването на типизираните блокове за нашата строителна практика по тази строителна система, бе извършена огромна изчислителна работа в ЦЕССИ с електронно-изчислителните машини IBM-370 и програмата STRUDL, използваща МКЕ. **В докторантската разработка тези изследвания представляват обаче нов етап в развитието на това направление.** Моделите се различават по начина на подпиране и са означени условно със С.1 - структурна конструкция, подпряна върху четири колони с оформени пространствени прътови капители и четиристранно конзолно издаване; С.2 - структурна конструкция, подпряна отново върху четири колони, но капители във вид на опорни диагонали и четиристранно конзолно издаване; С.3 - структурна конструкция, подпряна по контура на долният пояс; С.4 - структурна конструкция, подпряна по външния контур. **Върху така избраните структурни модели, авторката на дисертацията извършва едно сериозно изследване на прътовите конструкции в гранично състояние, като отчита следните особености в деформираното и напрегнато състояние на решетката:** *А/ Поради преобладаващите натискови усилия в прътите по горния пояс и в диагоналите и тяхната определяща роля за осигуряване на устойчивост и коравина на структурата е прието, че механизмите на разрушение ще се получат при изключване от работа на най-напрегнатите натискови пръти; Б/ Поради големия брой пръти и възли не се търсят независими механизми на разрушение при действие на параметрично нарастваща сила във всеки отделен възел, които да служат за получаване на съчетани механизми и съответно търсене на минимална стойност на товарният параметър.*

Численото решение е проведено с програмен продукт, базиран на Метода на крайните елементи, като са разгледани различни случаи на локални, симетрични и несиметрични натоварвания, съобразени с построени повърхнини на влияние. За определяне на критичната стойност на параметъра на натоварване е използвано стъпково нарастване на товара с последователни приближения, до намиране на гранично равновесно състояние на системата. При достигане на гранична носимоспособност на натиск на даден елемент се приема, че той излиза от работа и при следващия изчислителен етап приносът му не се отчита. Изследването е проведено в условията на геометрична нелинейност, с отчитане на Р- Δ ефекта, т.е. влияние на нормалните усилия върху коравината на системата, като се предполага, че преместванията нарастват след изключване на елементи от работа. Условията за равновесие са отново записани спрямо деформираното положение на структурата.

Резултатите от проведените числени решения при изследване на граничното състояние за четирите модела на структурни конструкции, които документират обща тенденция на поведение, наподобяващо работата на еласто-пластично тяло, съдържат безспорни високо научно-приложни приноси. Независимо от твърдението, че по същество разрушаването се дължи на последователно изключване от работа на максимално натиснати пръти, работещи в еластичен стадий, **поради отчитането на геометричната нелинейност, общото поведение на системата имитира работата на еласто-пластичен материал.** Стават

очевидни няколко факта, а именно: подпиране на структурната конструкция при модели С.1 и С.2 увеличава граничния товар; контурното точково подпиране по долния пояс при модел С.3 понижава граничната носимоспособност на структурата; най-уязвими при претоварване на структурната конструкция са диагоналните пръти в близост до подпирането. **Тука може да се коментира**, че подходът на изследването чрез изключване на пръти от работа, е с предварително уточнена схема на тяхната работата, т.е. даден прът работи до момента, в който неговата носеща способност се изчерпи. Това дава възможност след загубата на прът или група пръти да се проследят броя на прътите, в които се пораждат допълнителни нормални усилия. **По този начин може да се оценят застрашените конструктивни пръти от претоварване и да се вземат необходимите конструктивни мерки за предотвратяване на тяхното разрушение.** От показаните схеми на последователно изключване на пръти се вижда, че първо излизат от строя прътите, намиращи се в близост до колоните. Поради преразпределение на усилията, се наблюдава прогресивно изчерпване на носимоспособността на все повече пръти. Тези схеми показват първите реално застрашени от загуба на носимоспособност пръти. **Всички тези разсъждения и изводи направени по-горе ясно подсказват на проектантите на тези конструкции, че тези факти трябва да се вземат в предвид в съответните етапи на проектиране на пространствените структури, за да се предотврати тяхното разрушение при достигане на граничното им натоварване.**

Относно разгледаните на стр. 175 и стр. 180, етапи от последователното изключване на пръти, чрез които се наблюдава процесът на прогресивно разрушаване (**Progressive Collapse**), бих препоръчал на докторантката да разгледа в своя бъдеща работа този проблем в контекста на новото направление за изследване на строителните конструкции известни под името: "Design for Robustness", SED, No:11 F.Knoll, Th.Vogel, IABSE, 2009. Описаните в БДС-EN-1991-1-7 –Еврокод 1 и американските норми: „GSA, Guidelines , Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines for New Federal Office Buildings and Major Modernizations Project,2003”, дават дефиницията за здравината на конструкцията, която се асоциира с нейната способност да устои на редица събития, като пожари, експлозии, динамични въздействия или последици от човешки грешки, без да бъде повредена до прекомерно големи размери. Търсейки непрекъснатостта (continuity) на структурите, определена от взаимната свързаност между отделните конструктивни елементи, увеличаване броя на възможните пътища на изтичане на товарите, при възникването на описаните от докторантката процеси в конструкцията, ще повиши носимоспособността срещу местно разрушаване (виж стр.49 в Гл.1). В случая аспирантката трябва да потърси допълнителната „преосигуреност” на конструкцията, дефинирана като „redundancy”, която обединявайки многобройните възможности на наличните носещи конструктивни елементи, трябва да поеме допълнителното натоварване, в случаи на местното разрушаване на структурите; трябва да се търси запазване целостта като състояние на системата (integrity), при която конструктивните елементи остават свързани помежду си даже и след появата на особеното събитие. Трябва да се даде отговор на чувствителността на конструкцията към локални повреди (vulnerability), защото малки такива водят до прекалено големи последствия. Да се обяснят явленията от изследванията със способността на конструкцията да развие големи пластични деформации, без загуби от своята носимоспособност, т.е. да се отчете влиянието на дуктилността на елементите върху верижното разрушаване, чието наличие представлява основен фактор, с

който се повишава конструктивната здравина на конструкцията. Как се постигат начертаните по-горе цели? Естествено, чрез търсене на пътища за избягване на верижното разрушаване и локализиране на повредата. Тук вече ще се търсят подходящите за изследването на верижното разрушаване методи на линеен и нелинеен статичен анализ, а така също методите за линеен и нелинеен динамичен анализ, които докторантката много добре познава. **Предписания за осигуряване срещу верижно разрушаване съществуват в много съвременни нормативни документи за проектиране на строителни конструкции, но за решетъчни куполи и структури те са все още в зародиша си.**

Тук е мястото да се подчертае, дълбокото вникване на докторантката във философията на проблема свързан с хлътването на възлите в решетъчните куполи (стр. 49 от гл.1 и стр. 162 от гл. 4), който произтича от анализът на тяхната **устойчивост**. Това е вторият по значение проблем в изследване устойчивостта на куполите, след определяне на Ейлеровата критична сила, получена обаче след нелинейно изследване с отчитане и на огъвните деформации. Хлътването при сферичните черупки представлява **недопустимо възлово „отклонение“** на един или група възли, което се изследва, използвайки необходимото и достатъчно условие, за равновесие на една система записано като: $\delta(W_{ext} + W_{int}) = 0$, където: W_{ext} = потенциална енергия на външните сили, действащи върху нея, W_{int} = потенциална енергия на деформациите (работа на вътрешни усилия в многомерната система). Изразът: $W_{ext} + W_{int}$ представлява „общата потенциална енергия на системата“. Горепосоченият израз разкрива вариационния принцип на J. L. Lagrange (1788), който гласи че: *първата вариация на общата потенциална енергия на произволна еластична система, която е в равновесие, при безкрайно малко възможно преместване е равна на нула*. Използвайки този принцип е решена една друга интересна задача свързана с устойчивост на геодезически купол в научния труд на: {Aguilar,R.J.,” A study of the stability of framed triangulated geodetic domes under the Action of concentrated Loads”, PhD Thesis,1964, North Carolina State university). Този и други класически трудове алгоритмизирани в съвременните програмни продукти, които докторантката владее до съвършенство и позволяват да ни **приобщи в усещането, че ставаме съпричастни в разбирането на най-сложните проблеми на строителната механика.**

4.7. Констатации по Глава 5 (стр. 213-265): В тази глава е изследвано динамичното реагиране на еднослойни дискретни сферични куполи и двуслойни прътови конструкции.

4.7.1 Динамично реагиране на еднослойни дискретни сферични куполи

Като обекти на изследване са разгледани седемдесет модела на куполи. При генерирането на изчислителните модели са приети следните фиксирани параметри: диаметър на основата $D=30m$; диаметър на ключовия пръстен $d_k=1,65m$; цикличен ъгъл при основата $\beta=15^\circ$; брой на паралелите, разделящи меридианните линии $n=7$; корава връзка на елементите с опорния пръстен; корава връзка между елементите от структурната решетката. Натоварването е статично и динамично. Статичното натоварването е вертикална проекция на условно ососиметрично натоварване, равномерно разпределено върху хоризонтална площ, равна на основата на купола. Интензивността е приета $q=5kN/m^2$, която приблизително отчита натоварването от постоянни товари (собствено тегло на конструкцията и покритието) и временен товар от сняг. Динамичното натоварване е симулация на сеизмично въздействие.

Самото сеизмично въздействие е зададено с три независими една от друга компоненти (две хоризонтални и една вертикална) със *100%* спектър на реагиране. При изследването на избраните дискретни сферични куполи е отчетено самостоятелното действие на всяка една от компонентите. Също така е направено комбиниране по направление на въздействието по методите *SRSS* (корен квадратен от сумата на квадратите) и правилото на *30-те процента*. **Целта на проведеното изследване е да се управлява динамичното реагиране на еднослойни дискретни сферични куполи.** Като основни показатели за съпоставка на изчислителните модели са използвани видът на собствените форми на трептене, коефициентът на ефективна модална маса и опорните реакции в съответна точка. Динамичното изследване на избраните изчислителни модели на еднослойни сферични куполи е проведено на два етапа: модален и спектрален анализи. Първо са получени собствените форми на трептене на разглежданите изчислителни модели и кореспондиращите им периоди. Също така, за всеки вариант са отчетени толкова форми на трептене, така че да бъде удовлетворен коефициентът на ефективна модална маса. От съпоставяне на изчислителните резултати, авторката е направила съответните изводи, с които рецензентът е съгласен. **Така проведеното динамично изследване на решетъчните куполи е принципно ново за тази област и е изключително интересно от практическата му гледна точка.** Рецензентът е на мнение, че ако бъдат извършени от страна на докторантката изследвания върху динамичното поведение на изпълнените вече куполи на В. Fuller и на F. Lederer, това ще представлява много силна крачка в нейното бъдещо развитие, като специалист в областта на моделирането на пространствено прътови конструкции.

4.7.2 Динамично реагиране на двуслойни прътови конструкции

В тази глава е изследвано динамичното реагиране и на двуслойни прътови конструкции. Като обекти на изследване са разгледани четири модела. Приета е ортогонална структурната решетка по горната и долна поясни повърхнини с размери на структурната клетка $3/3m$. Изчислителните модели се различават по начина на подпирание и са означени условно със С.1 - структурна конструкция, подпряна върху четири колони с оформени пространствени прътови капители и четиристранно конзолно издаване; С.2 - структурна конструкция, подпряна отново върху четири колони, но капители във вид на опорни диагонали и четиристранно конзолно издаване; С.3 - структурна конструкция, подпряна по контура на долният пояс; С.4 - структурна конструкция, подпряна по външния контур. **Динамичното изследване на избраните изчислителни модели на двуслойни прътови конструкции е проведено на два етапа: модален и спектрален анализи.** Първо са получени собствените форми на трептене на разглежданите изчислителни модели и кореспондиращите им периоди. Освен така, за всеки вариант са отчетени необходимите форми на трептене, така че да бъде удовлетворен коефициентът на ефективна модална маса. Резултатите са представени в табличен вид. След модалният анализ е проведен спектрален. За спектрална крива е използвана препоръчаната за група почва С. Като основен параметър за съпоставка на изчислителните резултати е използвано преместването в характерна точка. Представените резултати са в табл.V.25. Показано е как се управлява динамичното реагиране на двуслойни структури, подложени на сеизмично въздействие. При дадена геометрия това се свежда до избор на вид на структурната решетка и вид на граничните опорни условия. За

удовлетворяване на поставената цел разгледаните възможни варианти се оценяват на база показаните резултатите и се препоръчва вариант, който показва поведение, кореспондиращо с действителното желано такова. **Тъй като изследването е параметрично е важно още на етап модален анализ да се оценят получените форми на трептене и нежеланите такива да се оптимизират или изместят, с цел по-малка тежест в последващия спектрален анализ.** И по тази част от дисертацията може да се каже, че тези изследвания са изключително навременни и полезни за практиката. Те могат да спомогнат и за едно бъдещо изследване на структурите, подложени на динамични въздействия от покривни вентилатори, чието натоварване при такива изследвания за сега се приемат като статични–равномерно разпределени по покрива на структурата, което при сегашните възможности на програмните продукти и наличието на мощните компютри е повече от архаизъм.

4.8 Констатации по раздел: Основни изводи и заключения от провежданите изследвания (стр. 266-280)

В този раздел е изяснено: влиянието на типа на решетката на куполите върху якостта и коравината им, във функция от промяната на тяхната конструктивна височина; въвеждането на оценъчни показатели за повърхнините на влияние като: абсолютна, натискова и опънна плътност и техните производни: коефициент на натискова и опънна активация. Описана е методологията за изследване на прътови куполи и структурни плочи на устойчивост в гранично състояние при използване на подхода за изключване на пръти, изчерпали носимоспособността си на опън и натиск и методологията за изследване на динамичното реагиране на еднослойни дискретни сферични куполи и двуслойни пространствени конструкции. Към този раздел попадат и претенциите на авторката за научни приноси от проведените изследвания, трасирането на насоките в бъдещите изследвания. Тук са поместени публикациите на докторантката, свързани с темата на дисертацията, нейната декларация за самостоятелност и поднесени благодарности.

Към очертаните насоки за бъдещи изследвания, с които рецензентът е напълно съгласен, бих предложил на докторантката да обърне внимание при бъдещите си изследвания върху проблемът, свързан със завиряването на съвременните покривни конструкции. Този проблем на запад е известен под наименованието “ponding effect”. Той се проявява при повреда на отводнителната система на плоските покриви, което е причина те да се завиряват, вследствие на което натоварването от дъжд и сняг постоянно се увеличава, което води неминуемо до аварирание на покривната конструкция. Наличието на бордове на покрива в порядъка от 50-80 cm., води до допълнителен вертикален несиметрично разположен товар, който в дълбоката си част упражнява натиск върху покривната обшивка на сградата от 5,0 kN/m². Недостатъчно проученият феномен тревожи инвеститорите на едроплощни сгради в последните няколко десетилетия. Само в Холандия статистиката показва, че от 1990 год. до днес всяка година се разрушават около 20 широкоплощни покривни конструкции от този феномен. Една от причините за този факт е подценяването на това сериозно явление, като въздействие в съвременните плоски покриви, към които спадат покривните структури, изследвани в предложената докторантура. **Като една съществена причина за необхващането на този проблем все още в проектирането, се изтъква необходимостта от доброто познаване на нелинейните и итеративни методи за тяхното изчисляване, които**

от една страна са все още непопулярни в инженерните среди, но от друга страна докторантката владее много добре.

5. Изводи изготвени на основание анализираната докторска дисертация и приемане на формулираните от авторката на труда научни и научно-приложни приноси

Представената от докторанката ас. инж. Анита Костадинова Хандрулева, дисертация на тема: „**Линейни и нелинейни изчислителни модели на пространствени прътови конструкции**” съдържа огромна по обем анализирана научна продукция, отнасяща се за сложни механо-математически модели, отразяващи статико–динамичното поведение на пространствени прътови конструкции, подложени на външни статически и динамични товари. Получените от нея значими съвременни резултати представляват, според преценката на рецензента, нови стъпки в това развитие, с което вече специалистите, работещи в тази област, започват да се съобразяват. **Доказателство за това са цитиранията на нейните публикации от известни специалисти в тази област.**

Направените в този труд: всеобхватен и критичен анализ на развитието и съвременното състояние на пространствените прътови конструкции, сполучлив коментар върху избора на основните параметри на структурните конструкции, които се определят при проектирането им; анализ на различните методи и модели на тяхното изчисляване; формулиране два вида гранични състояния; подробно изясняване на определянето на критичния параметър на натоварване, използвайки трите теории от първи, втори и трети ред за равновесните състояния; пояснения на изчислителните процедури за решаване на нелинейните алгебрични уравнения, в основата на които лежат модифицирания метод на Нютон и метода на Нютон-Рафсон; анализи на (съставени от различни автори) формули за определяне на критичното натоварване за прътови куполи с регулярна триъгълна решетка; изследване на напрегнатото и деформирано състояние на седемдесет еднослойни дискретни сферични куполи, чийто изчислителните модели се различават по вида на граничните опорни условия, по вид на структурната решетка и височината им и според морфологията на структурната решетка, подложени на въздействието на различно по вид статично натоварване; оптимизиране теглата на сферичните прътови куполи с различни типове решетка при еднакъв основен диаметър и различни централни полуъгли, съответни на опорния паралел на купола, чрез въвеждане на нов параметър, който се означава като "линейна напрегнатост", при чието използване **не се налага извършването на реално статическо изчисляване и оразмеряване на прътите от куполната решетка**; повърхнини на влияние (ПВ) за усилия, които при куполите представляват тримерна графика; изследване на устойчивост на еднослойни куполи и двуслойни пространствени конструкции; изследване на динамичното реагиране на еднослойни дискретни сферични куполи и двуслойни прътови конструкции **представляват значителни научни и научно-приложни приноси**, които са лично дело на авторката, и които **като рецензент напълно одобрявам и убедено оценявам много положително**. Те са плод на дългогодишната и научна и научноизследователска дейност и представляват необходимото доказателство, че предложената в този формат дисертация, притежава качествата за присъждане на нейната авторка образователната и научната степен „**доктор**”.

6. Бележки на рецензента по дисертационния труд и по литературната осведоменост на кандидата

В представения от кандидатката в дисертационния труд списък на използваната литература, проличава нейната висока осведоменост за състоянието на проблема. **Разясняването на постиженията на научните работници от почти цял свят, работещи в тази област са много задълбочени и изчерпателни. Стилът на изложението и в някои моменти е даже завладяващ.** Това от своя страна считам, че е вече характерна черта на авторката на предложения дисертационен труд, която има вече зад гърба си и участия в две монографии. **Анализите и изводите от всяка една глава на дисертационния труд са представени доста професионално.** Отразените в трудът, научни и научно-приложни приноси са много добре премерени, като се има предвид количеството и качеството на специалистите работещи в тази област. Разгледаните числени примери в работата на докторантката, ясно демонстрират завършеността на изследванията и в представената дисертация. До числената реализация на поставената задача докторантката достига след едно обстойно и задълбочено проучване на голяма част от съществуващите в тази област трудове, цитирани в т.3 на рецензията.

За читателите на тази рецензия искам да подчертая, че авторката на тази дисертация вече преодолява сериозните предизвикателства на проблемите свързани с линейните и нелинейни модели на пространствени прътови конструкции. Формулираният от нея параметър „линейна напрегнатост” и позволяват да оптимизира теглото на една сериозна по своите размери покривна конструкция с размери в план 75/50m и височина 14m., която вече е изпълнена на обект SSRM София Саут Ринг, **което прави дисертацията и високо иновационна с реални научно-приложни приноси.** В изпълнението на тази конструкция намират приложение нейните алгоритми за оптимизация на теглото на конструкцията, моделите и за изграждане на повърхнини на влияние и концепция за динамичен анализ на конструкцията.

7. Публикации, монографии, учебници и автореферат

Написаните в съавторство с нейните научни ръководители и колеги от ас. инж. Анита Костадинова Хандрулева публикации в областта на строителната механика и строителни конструкции са до ден днешен общо **29** броя, отразени в сборници на международни конференции.

Авторката на дисертационния труд е издала през последните три години в съавторство общо 1 ръководство и една монография, а именно:

1. Ръководство за упражнения по Теория на еластичността, Устойчивост и Динамика на строителните конструкции, първо издание, 180 стр., издателство на ВСУ, София, (2011); (“Practical examples on Theory of Elasticity and Dynamics of Structures”, pp 180, VSU publishing house, Sofia, co-author, (2011)).

2. Моделиране на строителни конструкции с програмен продукт SAP 2000, първо издание, 390 стр., издателство на КИИП София, издателство на ВСУ, София, (2012); (“Structural modeling using SAP 2000”, first edition, pp 339, KIIP Sofia publishing house, VSU publishing house, Sofia, co-author, (2013)).

Представеният автореферат е композиран в концентрирана форма в 83 стр., отразяващ

напълно основните моменти от съдържанието на дисертационния труд, а именно: постигнати резултати, научни и научно-приложни приноси. Според мнението на рецензента авторефератът може да послужи за база на една нова интересна книга, в която допълнително могат да бъдат описани и решенията на интересните проблеми, които авторката посочва в раздела: „Насоки за бъдещи изследвания” на дисертацията си.

8. Отражение на научните публикации на кандидатката в нашата литература

От приложената справка е видно, че в доклади за конференции, монографии и дисертации за получаване на научна степен „доктор ” са цитирани 2 пъти трудовете на кандидатката. В дипломни работи за придобиване на образователна степен магистър и бакалавър е цитирана 50 пъти.

9. Обща характеристика на творческа дейност на авторката на дисертационния труд

9.1. Учебно-педагогическа дейност:

Ас. инж. Анита Костадинова Хандрулева води упражнения по дисциплината: Метод на крайните елементи и приложението му при моделиране на строителни конструкции във ВСУ „Л. Каравелов и ВТУ „Т. Каблешков”, София, за образователна степен „Магистър; „Теория на еластичността, динамика и устойчивост на строителни конструкции”, на български и английски езици за образователна степен „Бакалавър” във ВСУ „Л. Каравелов, София; „Строителна механика” I и II част за образователна степен „Бакалавър” – специалност „Строителство и архитектура на сгради и съоръжения във ВСУ „Л. Каравелов”, София; Компютърен анализ на конструкции с програмни системи във ВСУ „Л. Каравелов, София. В преподавателската си работа постоянно въвежда съвременни програмни системи за обучение на студентите, а именно: ANSYS, SAP2000, TOWER и други. Участва в ръководството на множество дипломанти, за изготвяне на сложни дипломни проекти от двете образователни степени. **Тя има право да се гордее с 38 успешно ръководени и защитени дипломни работи по образователна степен магистър и бакалавър по специалностите: Строителство на сгради и съоръжения и Строителство и архитектура на сгради и съоръжения през последните 5 години. През 2013 год. при нея си готвеха дипломните работи 11 турски студента на английски език.**

9.2. Научна, научно-приложна и професионална дейност:

Научно и научно-приложната си изследователската дейност, ас. инж. Анита Костадинова Хандрулева е отразила в публикации, включени в доклади на конференции, монографии и учебни помагала. Основните и приноси могат да се причислят към следните направления: Приложение на МКЕ при анализ на строителни конструкции; изграждане на повърхнините на влияние (ПВ) за усилие (опорна реакция, прътово усилие, момент, напречно или нормално усилие) в куполни еднослойни стоманени конструкции; моделиране на дискретни и гладки сферични куполи, чрез използване на frame и shell крайни елементи; изследване на устойчивост на еднослойни куполи и двуслойни пространствени конструкции; изследване динамичното реагиране на еднослойни дискретни сферични куполи и двуслойни прътови конструкции. Ас. инж. Анита Костадинова Хандрулева е била рецензент на 10 броя

дипломни работи за придобиване на образователна степен *бакалавър* или *магистър*.

Освен учебно-педагогическа и изследователска дейност ас. инж. Анита Костадинова Хандрулева извършва и проектантска и консултантска дейност, като е взела участие в проектирането и изграждането на над 20 жилищни, административни и производствени сгради. Изготвяла е множество конструктивни експертизи и становища, свързани с ново и съществуващо строителство. Тя притежава удостоверение за пълна проектантска правоспособност към КИИП. Член е на Факултетния съвет на строителен факултет на ВСУ „Любен Каравелов“ и Контролния съвет на ВСУ „Любен Каравелов“. Ръководител е на 2 проекта по НИЗ: “Моделиране и анализ на куполни конструкции и многослойни структури” и “Пространствени прътови конструкции”. **Членува в следните международни организации:** IASS (International Association of shell and spatial structures) от 2008 г. и в IABSE (International Association for Bridge and Structural Engineering) от 2008 год.

10. Признания за научната, научно - приложна и обществено-инженерна дейност

Научните и научно-приложни резултати на ас. инж. Анита Костадинова Хандрулева са добре познати на инженерната общественост у нас. Ас. инж. Анита Костадинова Хандрулева има участия в повече от 17 международни и национални научни форми със секционни доклади. Във връзка с дисертацията е получила два ласкави отзива за подпомагането с резултатите от своята дисертация при изграждането на няколко сериозни обекти в страната с пространствени конструкции. Единият отзив е от инж. Драгомир Даков, управител на фирма :”Метални конструкции Яна”, ЕООД. Другият отзив е от инж. Борислав Гънгов, Р-л на обект „София Саут Ринг Мол”, (Главболгарстрой АД). **Докторантката е носител на наградата от конкурса "Най добър млад механик" на националния комитет по ТПМ за 2013 год.**

11. Лични впечатления на рецензента за кандидата

Познавам ас. инж. Анита Костадинова Хандрулева от 2003 г., още като студентка във ВСУ „Л. Каравелов”. По време на следването и обучението и по дисциплината „Строителна Статика” 1 и 2 част, по която и водех лекции, си изградих сериозно мнение за нейната работоспособност, възможности и изявен интерес към научно профилиране в бъдещата и кариера. Впоследствие я опознах по-отблизо в периода на нашето сътрудничество в катедрата по „Механика” към ВСУ "Л. Каравелов”, което датира от 2007 год., където тя премина през длъжностите на хоноруван и редовен асистент, каквато е и до днес. През 2009 год. инж. Анита Костадинова Хандрулева печели конкурс за задочен докторант към катедра „Механика”, към ВСУ "Л. Каравелов". По време на подготовката и за конкурсите за длъжността за асистент през 2007 год. и докторант през 2009 год., като пряк участник в организирането на тези процедури, като ръководител на катедрата от една страна и от друга, като член на изпитните комисии, останах с отлични впечатления от нейната концентрираност и знания, които са в основата на нейното възходящо развитие. Високата и ерудиция, доброто и образование, владенето на чужди езици, както и голямата и любознателност и работоспособност са в основата на този динамичен възход и постижения. Инж. Анита Костадинова Хандрулева се проявява и като един много сериозен преподавател и ръководител на дипломанти. Характерно за преподавателската и дейност е въвеждането на нов подход в преподаването и използването на съвременни програмни системи. Имам преки

задълбочени впечатления и от участията и във Факултетния съвет към Строителния Факултет на ВСУ „Л. Каравелов“. **Не на последно място инж. Анита Костадинова Хандрулева е много отзивчива и етична колежка, винаги готова да вникне и помогне при решаването на проблемите на всеки един от колегите си.**

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение бих желал да изразя своето лично убеждение за представената докторска работа, което е формулирано в приложения по-долу текст.

Представеният труд има качествата и отговаря на изискванията за присъждане на научно-образователна степен „доктор“. **Същият съдържа значими научно-приложни приноси, които допринасят за разширяването на знанията ни за поведението на пространствено прътовите куполи и многослойни структури.** Научните и научно-приложните резултати са получени от лични изследвания и обобщения на автора, а заявените приноси са реално постигнати. Части от дисертационния труд са отразени в 5 публикации, докладвани на международни и национални конференции във ВСУ „Л. Каравелов“, ВСУ „Черноризец Храбър“, конференцията на Строителните конструктори в България, на 7-та международна конференция на IABSE-IACM, проведена в Сараево през 2011 год и конференцията на строителните инженери в Сърбия, INDIS 2012. Цялостната ми оценка върху представеният дисертационен труд: **„Линейни и нелинейни изчислителни модели на пространствени прътови конструкции“** ми дава основание да установя, че същият е изработен прецизно и задълбочено с помощта на съвременни изразни и помощни средства. Той напълно отговаря на изискванията на ЗРАСРБ и ЗНСНЗ и Правилника за неговото приложение. Докорантката е запозната в много голяма степен с постиженията на съвременната наука в областта на анализите на **„линейни и нелинейни изчислителни модели на пространствени прътови конструкции“**. Същата е представила нови решения и е предложила достатъчно значими за науката и практиката научни и научно-приложни приноси. Направените от мен бележки не се отразяват върху качеството на дисертационния труд и постигнатите резултати. Същият притежава качества на дисертационен труд за придобиване на образователна и научна степен „доктор“, по научната специалност 01.02.03 „Строителна механика, Съпротивление на материалите“. **Моята преценка за рецензирания труд е подчертано положителна.** Поради тази причина предлагам в качеството си на рецензент, по процедурата за придобиване на образователна и научна степен „доктор“ на многоуважаемото жури във ВСУ „Л. Каравелов“, да присъди на ас. инж. Анита Костадинова Хандрулева образователната и научна степен „доктор“ по научна специалност 01.02.03 „Строителна механика, съпротивление на материалите“.

София, 19 февруари, 2014 г.

Рецензент: 
(проф. д-р инж. Дончо Наумов Партов)