

РЕЦЕНЗИЯ

на проф. Христо Боянов Бояджиев, дтн,

Институт по инженерна химия при БАН

относно

дисертационния труд на проф. д-р инж. Йордан Янков Христов на тема:

**„Нелинейни и аномални приложни модели:
приблизени решения, анализ, синтез и примери“**

за придобиване на научната степен „Доктор на науките“ по научна специалност

5.10. Химични технологии

(Процеси и апарати в химичната и биохимичната технология).

Настоящата рецензия ми е възложена с решение на научното жури на първото заседание на 02.04.2018 г.

1. Кратки биографични данни и характеристика на научните интереси на кандидата

Йордан Янков Христов е роден на 07.09. 1954 в гр. Дупница През 1979 г. той завършва висше образование (магистър) в Технически Университет - София със специалност Електроинженер. През 1994 г. защитава дисертация на тема “Флуидизация с газ на феромагнитни насипни материали във външно магнитно поле” в ХТМУ и получава научната степен Кандидат на техническите науки (сега доктор) по специалността Химични технологии. От 1979 г. досега последователно е заемал следните позиции в катедра Инженерна химия на ХТМУ: **Инженер** (1979-1981), **Научен сътрудник** : (1981-1989), **Асистент** (1989-1992), **Главен асистент** (1992-1998), **Доцент** (1998-2014) и **Професор** (от 2014 – до сега).

Проф. Христов има над **172** научни публикации с над **1200** цитирания. **Информацията от основни бази за индексване на научна информация за проф. Христов към Февруари , 2018 е:**

- **SCOPUS: h-index = 21**, базиран на 76 регистрирани документа (1990- 2018)
- **ISI Thomson Reuters: h-index = 16**, базиран на 73 регистрирани документа (1990-2018)

2. Преглед на дисертационния труд и анализ на резултатите

Дисертацията представлява самостоятелен том със заглавие: „Нелинейни и аномални приложни дифузионни модели: приблизени решения, анализ, синтез и примери“, с автор проф. д-р инж. Йордан Янков Христов. Тя започва с въвеждаща част, позволяваща на читателя да се запознае с разглежданите проблеми и използваните изчислителни техники, автореферат, копия на публикации, списък на цитирания и съпътстващи документи.

Съдържанието на дисертацията е изложено на 726 стр., от които въвеждаща част от 66 стр. и основен текст, в това число таблици, графики и списък на литература, общо 660 стр. От приложен отделен списък на публикации и отбелязванията на първата страница на всяка глава е видно, че всички части от дисертацията (с изключение на Глава 4.6) са станали достояние на научната общност у нас и чужбина.

Моделирането е основен подход за получаване на количествена информация за процесите в химичната технология, биохимичните технологии и топлоенергетиката.

Научното познание (количественото описание на процесите) се базира на съчетанието на интуицията и логиката. В математиката интуицията е „аксиомата“ (безусловната истина), а логиката е „теоремата“, която използва логически аксиомата за получаване на количествени изводи. В естествените науки (физика, химия, биология) аксиомите („принципи“, „постулати“, „закони“) като правило не са безусловни, но също са основа за количествени изводи.

Процесите в химичната технология, биохимичните технологии и топлоенергетиката са физични (преноси на импулс, маса и топлина), химични и биохимични. Основните аксиоми са условни и представляват Постулата на Стокс (за линейната връзка между напрежението и скоростта на деформацията, представляващ основата на хидродинамичните модели за движение на Нютоновите флуиди), Първия закон на Фик (за линейната връзка между масовия поток и градиента на концентрацията, представляващ основата на моделите на линейната дифузия) и Първия закон на Фурие (за линейната връзка между топлинния поток и градиента на температурата, представляващ основата на моделите на линейното топлопренасяне). Горните аксиоми представляват основа и на линейните модели конвекция-дифузия и конвекция-топлопроводност.

В редица случаи масопренасянето инициира вторични течения, т.е. скоростта започва да зависи от концентрацията и моделите конвекция-дифузия стават нелинейни. Една друга класа нелинейни модели са случаите, когато нелинейността е резултат от нелинейността на горепосочените аксиоми.

Дисертационният труд е посветен на такъв тип нелинейни и аномални приложни модели, които представляват определен теоретичен и практичен интерес. Разгледани са модели, където Първият закон на Фик и Първият закон на Фурие са нелинейни, поради зависимостта на коефициента на дифузия (топлопроводност) от концентрацията (температурата) или от линейната координата. За решаването на проблемите при тези типове нелинейни процеси е направен много обстоен литературен обзор на възможностите за използване на различни теоретични модели и техники за решаване на уравненията в тези модели.

Дисертацията е написана на 756 страници, разделени на четири големи части **1, 2, 3, 4**, според типа на диференциалните оператори, използвани за моделиране на дифузионни процеси и две допълнителни **Част А** и **Част В**. В **Част А** е дадена информация, необходима за представянето на основните глави на дисертацията. Представени са накратко проблемите на нелинейната и аномална дифузия. Разгледани са основни дефиниции на класическото дробно-диференциално смятане, релаксационни ядра, принцип на изчезваща памет и примери, свързани с реологични проблеми, довели до широкото използване на дробно-диференциални модели.

Част 1

В **Част 1** са разгледани нелинейни дифузионни модели с локални производни. Основните резултати на изследванията са свързани с интегрални решения на дифузионни модели (нестационарна топлопроводност) с нелинейни дифузионни коефициенти. Показано е как за този тип дифузионни уравнения могат да бъдат получени приближени аналитични решения, в затворена форма, чрез директно прилагане на интегралния метод, без предварителна линеаризация на изходното уравнение. Основният метод на решение е метода на интегралния баланс, прилаган в различни модификации, без линеаризиране на дифузионните уравнения. Използван е метода на просто интегриране чрез предварителна трансформация на нелинейното уравнение в уравнение на топлинната вълна (**Глава 1.1**).

Това е първият успешен опит за решаване на дегенериращо дифузионно уравнение на нестационарна топлопроводност със степенен закон на изменение на коефициента на топлинна дифузия чрез интегрален метод.

Класическата форма на метода на двойно интегриране, позната като Refined integral method (**RIM**) е използвана в **Глава 1.2** за успешно решение на дегенериращо дифузионно уравнение на нестационарна топлопроводност, със степенен закон на изменение на коефициента на топлинна дифузия, чрез директно прилагане на интегрален метод, без предварителна линеаризация. Иновативен момент при решението е предварителната трансформация на нелинейния дифузионен член и използването на параболичан профил с недефинирана експонента.

В **Глава 1.3** е решена задачата за нестационарна топлопроводност с линейно-зависещ от температурата коефициент на топлопроводност. Използвае метод с двойно интегриране, предложен от автора, наречен за кратко **DIM (Double integration method)**. За решението е използвана предварителна трансформация на дифузионния член, която най-напред е използвана в **Глава 1.2**. Решена е силно нелинейната задача с условие на Нюман(зададен понок на границата) чрез предварителна нелинейна смяна на променливне и последващо използване на **DIM**. Резултатите са сравнени с числени решения и са дадени примери с данни за реални материали, както с положителни така и отрицателни коефициенти на изменение на дифузионния коефициент

Въпросите разглеждани в **Глава 1.3** са продължени в **Глава 1.4**, където е решена задачата с потенциално-степенен закон на изменение на коефициента на топлинна дифузия. Използван е метода с двойно интегриране **DIM**.

Глава 1.5 разглежда модификация на подхода с просто интегриране, чрез използване на допълнително дробно уравнение от порядък $\frac{1}{2}$, позволяващо да се избегне основния проблем възникващ при апроксимиране на градиента на границата. Анализът на получените резултати показва, че при този подход и решението, съответствуват на метода с използване на първия момент на дифузионното уравнение

Глава 1.6 демонстрира иновативен подход за решаване на дифузионни модели с висок порядък на дифузионния член, при който известните методи като **RIM**, метода с просто интегриране и развития от автора **DIM**, са частни случаи. Методът е демонстриран чрез решение на уравнението на Mullins за термично набраздяване на повърхности чрез механизъм на повърхностна дифузия.

Глава 1.7 показва нагледно ефективността на метода с двойно интегриране **DIM** за решаване на нелинейното уравнение на Mullins за термично набраздяване на повърхности чрез механизъм на изпаряване-кондензация.

Глава 1.8 позволява нагледно да се разбере една от основните техники при решаването на нелинейните модели, разглеждани в Част 1, а по-точно трансформацията на нелинейния дифузионен член. Показно е основното предимство на използвания параболичен профил с недефинирана експонента и неговото представяне чрез сходящ се алтернативен ред, което е предимство при апроксимация на дробни по време и пространство производни.

Част 2

В **Част 2** са разгледани дифузионни модели със сингулярна изчезваща памет. Основните резултати са свързани с получаването на приближени решения на линейни и нелинейни субдифузионни и супердифузионни модели чрез метода на интегралния баланс. Направен е нов извод на известното уравнение на Ward-Tordai за адсорбция на сърфактанти, изцяло с апарата на дробното диференциално смятане.

Глава 2.1. дава възможност да се види как методът на интегралния баланс може да се прилага към модели, съдържащи интеграли със сингулярна памет.

Глава 2.2. използва метода интегралния баланс, с техниката на двойно интегриране, за приближено решаване на линейното субдифузионно уравнение, както с производна на Riemann-Liouville, така и с производна на Caputo. Дискутирани са няколко подхода за определяне на оптималните експоненти на приближените решения. Приближените решения са сравнени с точните решения на Mainardi.

Глава 2.3. разглежда нелинеен субдифузионен модел, който е дробно-дифференциален аналог на проблема, разгледан в **Глава 1.3.**, но тук се развива идеята, представена в **Глава 2.2** с използване на модифицирания метод **ДИМ**. Получено е и приближено аналитично решение на нелинейното дегенериращо субдифузионно уравнение и ясно е демонстрирано конкуриращото влияние на параметъра на дробния порядък и степения коефициент на дифузионния коефициент.

Глава 2.4. разглежда приближено интегрално решение на дробно по време дифузионно уравнение, от порядък $0 < \mu < 1$ с коефициент, зависещ от времето по степенен закон $D(t) = D_0 t^\beta$, където $0 < \beta < 1$. Показано е, че приближеното решение позволява да се заключи, че сумата от индексите $(\mu + \beta)$ моделира субдифузионен пренос ако $(\mu + \beta < 1)$, докато при $(\mu + \beta > 1)$ процесът на пренос е супердифузионен, а Гаусова дифузия се наблюдава при за $(\mu + \beta = 1)$.

В **Глава 2.5.** са получени приближени интегрални аналитични решения на супердифузионно уравнение (с дробна по време пространствена производна на Riemann-Liouville) в полубезкрайна област. Метод е демонстриран чрез задача на Дирихле.

Глава 2.6. е развитие на интегралните решения на супердифузионни уравнения, но сега пространствената корелация на дифузионния коефициент е представена със степенна функция. Дискутирана е тази форма на корелация към възможните режими на бърза и бавна пространствена супердифузия.

Глава 2.7. развива приближено интегрално решение на супердифузионно уравнение с потенциално-степенна пространствена корелация на дифузионния коефициент. Ясно е показан, че реципрочната стойност на разликата между дробния порядък β и пространствената експонента на дифузионния коефициент α , контролира дифузионния процес и определя преходите от субдифузионен към супердифузионен механизъм на пренос.

Глава 2.8. показва един напълно нов извод за уравнението на Ward-Tordai за адсорбция на сърфактанти, направен изцяло с апарата на дробното диференциално смятане. Основният резултат и принос е формулирането на унифицирано нелинейно дробно диференциално уравнение от порядък $1/2$, моделиращо адсорбция на сърфактанти в режим на дифузионен контрол.

Част 3

В **Част 3** са разгледани дифузионни модели със несингулярна изчезваща памет. Основните резултати на изследванията са свързани с изводи на дифузионни модели с несингулярна (експоненциална) памет, където демфифиращият ефект е представен чрез интегрален оператор на Caputo-Fabrizio. Показано е как този дробен интегрален оператор възниква чрез конститутивно уравнение *поток-градиент*, използващо постановката (концепция) на Cattaneo, чрез интеграл с експоненциална памет.

Глава 3.3. Тук е формулиран *модел с пространствена памет* и се дефинира *пространствен интегрален оператор с експоненциално несигулярно ядро*, от тип Caputo . Полуни са аналитични решения за случай на стационарна дифузия. Дефинирана е връзка с параметъра определящ участъка с участъка с пространствена памет и дробния параметър на интегралния оператор.

Глава 3.4. Направен е извод на дробно-диференциален модел на Додсън, при който потока и градиента са свързани с интеграл с експоненциална памет, следващ постановка на Cattaneo. Като слествие е формулиран дифузионен модел със сложна памет, отчитащ съвместни релаксационни ефекти с големи и малки времена. Дефинирана е функционалната връзка между дробния параметър и дифузионното число на Deborah.

Глава 3.5. Анализирани са проблемът с формалната фракционализация на дифузионното уравнение и възникващите противоречия, когато производната по време в класическия модел на Фурие (Фик) се замени формално с оператора (по време) на Caputo-Fabrizio, приеман условно за дробна производна.

Глава 3.6. Направен е анализ на основния проблем: какъв тип памет се моделира чрез експоненциалното ядро, използвано в оператора на Caputo-Fabrizio? Използван е обобщеният модел на разтеглената експоненциална функция на Kohlrausch.

Глава 3.7. Представени са модели на реални проблеми, където експоненциалната релаксационна функция е получена експериментално или в резултат на развитие на модел. Това дава основание за по-нататъшно развитие на този тип модели чрез нови формулировки на интегралния оператор на Caputo-Fabrizio.

Част 4

В **Част 4** са разгледани като приложения няколко примера.

Глава 4.1. Получени са приближени интегрални решения на нелинейното дифузионно уравнение на Додсън, както от цял порядък, така и на формално фракционализирани версии. Показано е, че е възможно решение чрез автомоделна променлива след начална нелинейна трансформация.

Глава 4.2. Решена е първата задача на Стокс, за модели от цял и дробен порядък, за флуид на Casson с използване на различни видове дробни (по време) производни. Направен е критичен анализ на използваните до този момент модели и е изследвана формалната фракционализация и подход с дефиниране на конститутивни уравнения. Приближените решения са получени чрез интегрален метод и параболичен апроксимиращ профил с недефинирана експонента.

В **Глава 4.3.** е получено решение на първата задача на Стокс чрез метод на двойно интегриране, когато релаксацията се моделира със смесена производна по време-пространство. Разгледани са два основни случая: модел от цял порядък и дробно-диференциален модел. За модел, върху който е показана ефективността на DIM, е използвано уравнението на ненютонов флуид. Показано е, че може да се дефинират автомоделни променливи, отчитащи както Нютоновите така и Ненютоновите ефекти на нестационарното решение.

Глава 4.4. Решено е радиационното дифузионно уравнение, чрез прилагане на метод на интегралния баланс с двойно интегриран и са получени приближени аналитични решения в затворена форма .

Глава 4.5. Разглежда прилагането на метода с многократно интегриране за решаване на дробно-диференциален модел от 4-ти порядък на повърхностна дифузия (субдифузия)

като вариант на уравнението на Mullins. Получено е приближено интегрално решение чрез метода с многократно интегриране (MIM), който е предложен от автора.

Глава 4.6. това е ново интегрално решение на задача, свързана с кинетиката на дифузионно контролирана адсорбция (дифузионен контрол в макропорите на адсорбента) и моделирана чрез квадратична нелинейност на Fujita, която води до правоъгълни изотерми на Лангмюр. Получени са ефективни приближени решения на модела, формулиран от Ruthven. Получените резултати са сравнени с известните аналитични решения от литературата и експериментални резултати на Ruthven.

3. Оценка на съответствието на автореферата и дисертационния труд

Представеният автореферат правилно и ясно отразява основните резултати приноси на дисертацията

4. Характеристика и оценка на приносите в дисертационния труд

Приноси от Част 1

1. **Глава 1.1 и Глава 1.2:** Получени са интегрални решения на нестационарна топлопроводност със степенен коефициент на топлинна дифузия

2. Получени са интегрални решения с линейна (**Глава 1.3**) и потенциално-степенна (**Глава 1.4**) зависимост на топлинния дифузионен коефициент от температурата в лучаите на нестационарна топлопроводност. Предложен и успешно използван е иновативен метод двойно интегриране (**DIM**).

3. **Глава 1.6:** Развит и успешно приложен е **нов метод с многократно интегриране (MIM)**, който позволява приближени решения на дифузионни уравнения от висок ред. Методът с просто интегриране и методът с двойно интегриране (**DIM**) са частни случаи на **MIM**.

4. **Глава 1.7:** Методът с двойно интегриране (**DIM**) е използван успешно за получаване на **ново интегрално решение** на нелинейното уравнение на Mullins за термично набраздяване на повърхности чрез механизъм на изпарение-кондензация.

Приноси от Част 2

В този част иновативно е развито приложение на интегралния метод на решение, а по-специално методът с двойно интегриране (DIM) за решаване на субдифузионни и сепурдифузионни задачи

1. Успешно са демонстрирани интегрални приближени решения на субдифузионни уравнения с постоянен (**Глава 2.2**), степенен (**Глава 2.3**) и зависещ от времето (**Глава 2.4**) дифузионен коефициент.

2. Получени са приближени решения на супердифузионни уравнения с постоянен (**Глава 2.5**), степенен (**Глава 2.6**) и потенциално степенен (**Глава 2.7**) дифузионен коефициент.

3. Съществен принос на **Глава 2.8** е направения нов извод на известното уравнение на Ward-Tordai. **Формулирано е ново и унифицирано нелинейно дробно диференциално уравнение** от порядък $1/2$, моделиращо адсорбция на сърфактанти в режим на дифузионен контрол.

4.3. Приноси от Част 3

В тази част на дисертацията, основните резултати, които са и съществени научни приноси, са свързани с извод за нелинейни дифузионни модели с експоненциална памет в термини на интегралния оператор на Caputo-Fabrizio

1. Изведени са едномерни дифузионни модели с временна (Глава 3.2) и пространствена (Глава 3.3) експоненциална памет при използване на конститутивен подход на Cattaneo по време и пространство. Показано е, възникването на оператора на Caputo-Fabrizio допълнителен релаксационен член в дифузионно уравнение.

2. Направена е иновативна постановка на задача за нестационална топлопроводност с пространствена експоненциална памет. Полумени са получени аналитични решения за стационарен процес (Глава 3.3) и е показано влиянието на пространствената памет върху отклоненията на температурното разпределение от това описано с линейния закон на Фурие. Анализът в тази глава успешно свързва дробният параметър с геометричните параметри на пространствената памет.

3. Дефинирана е нова пространствена производна от тип Caputo-Fabrizio (Глава 3.3).

4. В Глава 3.4 е показан е, и успешно проведен, **нов извод** на дифузионното уравнение на Додсън **като обобщен дробно-диференциален модел, чрез конститутивен подход свързващ потока и градиента, чрез интеграл с експоненциална памет**. Формулиран е модел с две паметни за малки и големи времена, съответно, при едновременно действие на различни релаксационни процеси.

5. Дефинирани са функционалните зависимости на дробния параметър на интегралния оператор на Caputo-Fabrizio с геометричната характеристика за зоната с пространствена памет (Глава 3.3) и с дифузионното число на Deborah (Глава 3.4). **Това са нови факти и приноси, които са първи публикувани в литературата.**

4.4. Приноси от Част 4

Получени са приближени интегрални решения на практически важни задачи свързани с технологични процеси, а именно :

1. Уравнение на Додсън за дифузия в твърди материали (Глава 4.1), нестационарно течение на неньютонов флуид (Глава 4.3), радиационно дифузионно уравнение, субдифузионно уравнение на повърхностна дифузия свързано с процеса на термично набраздяване (Глава 4.5).

2. Ново решение на кинетиката на дифузионно контролирана (в макропорите) адсорбция (модел на Ruthven) с квадратична нелинейност на Fujita (Глава 4.6).

3. Анализирани са проблемът с формалната фракционализация на моделните уравнения и физическата адекватност на този подход чрез първа задача на Стокс за флуид на Casson (Глава 4.2).

4. Получено е успешно приближено интегрално решение на нелинейното уравнение на радиационен пренос на топлина в дифузионно приближение (Глава 4.4)

В дисертацията е включена и **Част В**, където разглеждат в кондензиран вид, паралелно на формулираните в началото цели и задачи, се представят основните резултати от изследванията и свързаните с тях научни приноси.

В Част В обобщава основните резултати на дисертацията в четири основни направления, а именно:

- **Приложения на интегралния метод към нелинейни и аномални дифузионни модели с локални и нелокални производни и развитие на негови модификации.**
- **Извод (синтез) на дифузионни модели на физични процеси с памет.**
- **Анализ на дифузионни модели с нелокална (сингулярна и несингулярна памет)**
- **Получаване на приближени решения на практически важни задачи.**

Приемам всички научни и научно-приложни приноси на дисертацията, на базата на горният анализ и на отражението на резултатите в научната литература, като по този начин ясно подчертавам съществения принос на дисертанта в развитието на приближените интегрални решения на нелинейни и аномални дифузионни задачи свързани с с реални практически ориентирани инженерни проблеми

5. Мнение за публикациите на дисертанта по темата на дисертационния труд

Резултатите в Дисертацията са представени в 27 публикации, от които 6 са в глави от книги и 15 в списания с импакт фактор. Забелязани са 178 цитата на публикациите по Дисертацията, които сами по себе си говорят за стойността на получените резултати.

Информацията преставена от основните бази за индексирание на научна информация за проф. Христов към Февруари, 2018 е:

- SCOPUS: **h-index = 21**, базиран на 76 регистрирани документа (1990- 2018)
- ISI Thomson Reuters: **h-index = 16**, базиран на 73 регистрирани документа (1990-2018)

6. Критични бележки и коментarii

Нямам критични бележки и коментarii по текста на дисертацията и публикациите върху които тя е изградена

7. Лично впечатление за дисертанта

Познавам професор Христов и неговото професионално развитие повече от 25 години. Професор Христов е успешен учен с международно призната активност и приноси, които ясно са отразени в научната му биография и отражението на резултатите в литературата. За това

Заклучение

Целта на всеки дисертационен труд, представен за придобиване на научната степен „Доктор на науките“, е решаването на значим научен проблем с помощта на набор от научн-изследователски (теоретични, експериментални) техники, чиито брой е количествена мярка за научната компетентност. В този смисъл представеният труд изпълнява тези изисквания, защото решава проблеми на нелинейните дифузии и топлопроводност с впечатляващ напор от теоретични техники.

В заключение смятам, че поставените в началото на дисертацията задачи са решени, а целите са постигнати.

Всичко написано от мен по-горе ми дава пълното основание да твърдя, че представената от проф. д-р Йордан Янков Христов дисертация за получаване на научната степен „Доктор на техническите науки“ по научна специалност 5.10. „Химични технологии“ (Процеси и апарати в химическата и биологичната технология) на тема: „Нелинейни и аномални приложни дифузионни модели: приближени решения, анализ, синтез и примери“ съдържа достатъчни по значимост приноси и има всички качества за получаване на научната степен „Доктор на техническите науки“, изисквани от ЗРАСРБ, Правилника за приложението му и Правилника за придобиване на научни степени и заемане на академични длъжности в ХТМУ-София.

Ето защо с пълна убеденост предлагам на уважаваните от мен членове на научното жури да приеме и оцени положително дисертацията, представена от проф. д-р инж. Йордан Янков Христов и му присъди научната степен „Доктор на техническите науки“ по научна специалност 5.10. „Химични технологии“ (Процеси и апарати в химическата и биологичната технология).

София, 27.04.2018 г..

Рецензент:

/проф. д-р инж. Христо Бояджиев/