





**БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ  
ИНСТИТУТ ПО ИНЖЕНЕРНА ХИМИЯ**

Константина Владимирова Стефанова

**ИЗСЛЕДВАНЕ И МОДЕЛИРАНЕ НА ХИДРОДИНАМИКАТА В КОЛОНИ СЪС  
СЪВРЕМЕННИ ВИСОКОЕФЕКТИВНИ НЕНАРЕДЕНИ ПЪЛНЕЖИ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

на дисертационен труд за присъждане  
на образователната и научна степен „доктор“

по специалност

Процеси и апарати в химичната и биохимичната технология

в професионално направление

4.2. Химически науки

Научен ръководител:

доц. д-р Татяна Петрова и доц. д-р Даниела Джонова

София, 2019 г.



Дисертационният труд съдържа: 164 страници, 20 таблици и 30 фигури. В библиографията са включени 206 литературни източника (50 бр. след 2009г.).

В дисертацията са представени предимно експериментални изследвания извършени в Институт по Инженерна Химия – БАН, София, като част от тях са използвани при моделирането на хидродинамичните ефекти, включително и с компютърна програма за изчислителна хидродинамика CFD – Ansys (Fluent).

Защитата на дисертационният труд ще се проведе  
на ..... от ..... часа  
в Институт по Инженерна Химия – БАН, София,  
ул. Акад. Георги Бончев, бл.103

Тема: Изследване и моделиране на хидродинамиката в колони със съвременни високоефективни ненаредени пълнежи

Автор: маг. инж. Константина Владимирова Стефанова

Материалите по защитата са на разположение, на интересуващите се,  
в канцеларията на Институт по Инженерна Химия – БАН, София



**БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ  
ИНСТИТУТ ПО ИНЖЕНЕРНА ХИМИЯ**

Константина Владимирова Стефанова

**ИЗСЛЕДВАНЕ И МОДЕЛИРАНЕ НА ХИДРОДИНАМИКАТА В КОЛОНИ СЪС  
СЪВРЕМЕННИ ВИСОКОЕФЕКТИВНИ НЕНАРЕДЕНИ ПЪЛНЕЖИ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

на дисертационен труд за присъждане  
на образователната и научна степен „доктор“

по специалност

Процеси и апарати в химичната и биохимичната технология

в професионално направление

4.2. Химически науки

Научен ръководител:

доц. д-р Татяна Петрова и доц. д-р Даниела Джонова

Научно жури:

проф. д-р Ирен Цибранска

доц. д-р Даниела Джонова

проф. д-р Румен Даракчиев

проф. д-р Христо Бояджиев

доц. д-р Илонка Съйкова

София, 2019 г.

## Съдържание

1. Въведение	5
2. Цели и задачи на дисертацията	6
3. Експериментални изследвания на хидродинамичните ефекти в колони със съвременни високоефективни ненаредени пълнежи на основата на разпределението на течната фаза	8
3.1. Постановка на експеримента	8
3.2. Устройство на използваната полупромишлена колона с пълнеж	10
3.3. Методика за получаване и обработка на експериментални данни	14
3.4. Оценка и анализ на началното разпределение на течността след оросителя посредством RSRM 1.5", $H = 0.15\text{ m}$	16
3.5. Представяне и анализ на експериментални данни за RSRM 1.5", $H=0.6\text{ m}$ , при начално подаване на течност по напречното сечение на колоната	18
3.6. Представяне и анализ на експериментални данни за пълнежите: RSRM 0.7", 1.5" и 3", RSRP 0.6" и 2.0", Ralu Flow 1.0" и 2", $H = 0.6\text{ m}$ , при начално подаване на течна фаза по напречното сечение на колоната	20
3.7. Представяне и анализ на експериментални данни за пълнежите: RSRM 0.7", 1.5" и 3", RSRP 0.6" и 2.0", Ralu Flow 1.0" и 2", $H = 0.6\text{ m}$ , при пристенно оросяване	21
3.8. Представяне на обобщени данни за разпределението на течната фаза с осреднени стойности по видовете пълнежи - RSRM, RSRP, Ralu Flow, $H=0.6\text{ m}$	23
3.9. Оценка и анализ на разпределение на течността в различните пълнежи: RSRM 0.7", 1.5" и 3", RSRP 0.6" и 2.0", Ralu Flow 1.0" и 2", $H = 0.6\text{ m}$ посредством фактора на неравномерност $M_f$	24
4. Математично моделиране с дисперсионния модел на разпределението на течната фаза в колони с пълнеж и идентификация на моделните параметри	25
4.1. Подходи за определяне на параметъра $C$	25
4.2. Еднопараметрична идентификация	26
4.3. Резултати от еднопараметрична идентификация с данни за RSRM 1.5"	27
4.4. Резултати от еднопараметрична идентификация с данни за RSRM 0.7", RSRM 1.5", RSRM 3", Dzhonova et al. (2017, 2018a)	28
4.5. Резултати от еднопараметрична идентификация с данни за метални Pall rings - 1", Yin (1999)	30
5. Стартиране на математично симулиране със CFD програма	31
5.1. Постановка на математичното симулиране със CFD програма, ANSYS – FLUENT	31
5.2. Резултати от математичното симулиране с ANSYS – FLUENT	33
Приноси от извършената изследователска дейност	34
Основни означения	36
Публикации и цитати, свързани с дисертацията	38

## 1. ВЪВЕДЕНИЕ

Колонните апарати с пълнеж се отличават с голяма ефективна междуфазова повърхност в сравнително малък обем в условия на противотоково движение на потоците, особено при ползването на новите високоефективни пълнежи. Намерили са широко приложение в практиката и иновативните технологии при масообменните процеси с методи като абсорбция, десорбция, ректификация, дестилация, екстракция, катализа и други.

Утвърждаването им като ефективно средство в индустрията е постигнато след множество подробни експериментални и теоретични изследвания на хидродинамиката на потоците в колоните с пълнеж. И днес, изследователският интерес по темата не стихва и се приема за част от световния стремеж за стабилни процеси както и като ефективно решение за намаляване на замърсяванията в околната среда.

От друга страна, заинтересованите индустрии, все по-често търсят информация за оптимизиране и разширяване на областта на приложение на известните пълнежи.

За удовлетворяване на тези потребности се налага прецизно изследване на възможностите на известните в практиката високоефективни пълнежи.

Освен традиционния похват за изследване с експерименталните методи, които в някои случаи са единствената възможност за проверка и доказване на теориите за реалните процеси, бързо навлизат и теоретичните методи за изследване. Ново предизвикателство за надеждното изучаване и оптимизиране на сложните явления в хидродинамиката, са теоретичните математични модели.

С математичните модели вече могат да се прогнозира: хидродинамиката; масообмена; характеристиките на колони с пълнеж; явления като надлъжното смесване, вида на дифузията; да се оценяват възможностите на дискретната структура на пълнежа.

Теоретичните изследвания се разширяват и със съвременните компютърни симулационни пакети за изчислителна хидродинамика. Така иновативната връзка между интелигентните технологии и математичното моделиране бързо навлиза и предлага отговори на множество индустриални проблеми.

Настоящият дисертационен труд ще е продължение на работата на екипа на ИИХ – БАН и ще е съсредоточен върху изследването на хидродинамичните ефекти като разпределението на течната фаза и стенния поток в колони с различни високоефективни пълнежи. Получените данни ще послужат при математично моделиране и симулиране с методите на CFD програма.

## 2. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ НА ДИСЕРТАЦИЯТА

### Цели:

- 1) Провеждане на експериментални изследвания на хидродинамичните ефекти като разпределението на потоците в централната и периферна област в колони с високоефективни ненаредени пълнежи.
- 2) Теоретично изследване на възможностите за определяне на моделен параметър  $B$  (критерий за обмена на течност между стената на колоната и пълнежа) от дисперсионният модел при налични данни за коефициента на разтичане  $Dr$  и параметър  $C$  (критерий за достигане на равновесие между потоците от пълнежа и стената, при височина на пълнежния слой ( $z \rightarrow \infty$ )), да бъде определен от експерименталните данни;
- 3) Стартиране на теоретични изследвания с компютърни симулационни пакети за изчислителна хидродинамика (CFD) като Fluent в ANSYS, в съответствие с избран експеримент;

За обект на изследванията са избрани наложилите се в практиката ненаредени пълнежи: *метални Raschig Super-Ring* пълнежи (означени в изследванията и резултатите като RSRM 0.7", RSRM 1.5", RSRM 3"), *пластмасови Raschig Super-Ring* (означени в изследванията и резултатите като RSRP 0.6", RSRP 2.0") и *Ralu Flow 1.0", Ralu Flow 2.0"* пълнежи. След анализ на предишни изследвания на екипа е избрано за новите изследвания да се работи с височина на пълнежния слой  $H = 0.6 \text{ m}$ .



### Задачи:

- 1) Оценка и анализ на началното разпределение на течността след оросителя посредством *RSRM 1.5"* пълнеж, с височина на пълнежният слой  $H = 0.15 \text{ m}$ ;
- 2) Провеждане на детайлни експериментални изследвания на радиалното разпределение на течна фаза в колони с различни по размер и материали пълнежи – метални *Raschig Super-Ring - 0.7", 1.5", 3.0"*, пластмасови *Raschig Super-Ring - 0.6", 2.0"* и *Ralu - Flow - 1.0", 2.0"*, при височина на пълнежният слой  $H = 0.6 \text{ m}$ , при различни начални натоварвания по напречното сечение на колоната с плътност на оросяване:  $L_0 = 3 \times 10^{-3} \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \text{ s})$ ;  $L_0 = 4 \times 10^{-3} \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \text{ s})$ ;  $L_0 = 5 \times 10^{-3} \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \text{ s})$ ;  $L_0 = 7 \times 10^{-3} \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \text{ s})$ ;  $L_0 = 9 \times 10^{-3} \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \text{ s})$ ;  $L_0 = 10 \times 10^{-3} \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \text{ s})$ ;  $L_0 = 12 \times 10^{-3} \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \text{ s})$  и при пристенно оросяване с дебит:  $Q_0 = 0.3 - 0.55 \text{ m}^3 / \text{h}$  като посочените условия да се приложат за няколко презареждания на пълнежа;
- 3) Анализ за влиянието на началното натоварване, на презарежданията на пълнежа, на вида и размера пълнежа върху разпределението на течната фаза;
- 4) Оценка на неравномерността при разпределението на течната фаза по напречното сечение на колоната с пълнеж посредством фактора на неравномерност  $M_r$ ;
- 5) Намиране на моделен параметър  $B$  от дисперсионният модел за колони с пълнеж с идентификационният метод на Semkov et al. (2000), при налични данни: за коефициента на разтичане  $D_r$  и за параметър  $C$  - определян от експериментални данни за разпределението на течната фаза в пълнежите: метални *Raschig Super-Ring* и *Pall rings* (Yin, 1999);
- 6) Прилагане на техниките за моделиране със CFD програмата ANSYS - Fluent за 3D визуализация на течението на потоците, чрез разпределението на скоростта в целия обем на пълнежният слой, в съответствие с експеримент за *RSRM 1.5"* пълнеж, с височина на пълнежният слой  $H = 0.15 \text{ m}$ .

### 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ НА ХИДРОДИНАМИЧНИТЕ ЕФЕКТИ В КОЛОНИ СЪС СЪВРЕМЕННИ ВИСОКОЕФЕКТИВНИ ПЪЛНЕЖИ НА ОСНОВАТА НА РАЗПРЕДЕЛЕНИЕТО НА ТЕЧНАТА ФАЗА

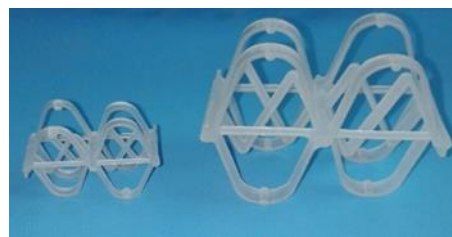
#### 3.1. Постановка на експеримента

##### Избрани пълнежи за изследване

- RSRM 0.7", RSRM 1.5" , RSRM 3"  
(метални Raschig Super-Ring пълнежи);



- RSRP 0.6", RSRP 2.0"  
(пластмасови Raschig Super-Ring пълнежи);



- Ralu Flow 1.0", Ralu Flow 2.0";



Последните две поколения пълнежи (Raschig Super-Ring, Ralu-Flow и IMTP) са типични представители на модерните високоефективни ненаредени пълнежи, наложили се в практиката поради: ниско хидравлично съпротивление, отворена структура, голяма междуфазова повърхност. Геометрията им води до накъсване на течните потоци и до често обновяване на течната повърхност. В следствие се образуват многобройни потоци, осигуряващ ефективен масообмен и локални микротурболентности на потоците. От изследователска гледна точка последните изброени ефекта силно затрудняват предсказването на хидродинамичните явления в пълнежите.

Последните поколения пълнежи, бързо навлизат в индустрията и често са предпочитани при реконструиране или проектиране на новите производства като заместват тарелките в колоните или се предлагат като конкуренция (по-ниска себестойност и добри работни показатели) на структурираните пълнежи.

## Експериментална инсталация и условия

- полупромишлена колона  $D_c = 470 \text{ mm}$ ;
- еднофазна система с подаване на течност в горната част на колоната  
- *водопроводна вода*;
- височина на пълнежният слой –  $0,15$  и  $0,6 \text{ m}$ ;
- оросителни устройства (оросители):  
- *за равномерно подаване на течната фаза по напречното сечение на колоната*;  
- *периферен тръбен оросител с отвори към стената на колоната за пристенно оросяване ( равномерно подаване на течната фаза в област близо до стената)*;
- начални средни плътности за оросяване по напречното сечение на колоната  $L_0$ :  
-  $3 \times 10^{-3} \div 12 \times 10^{-3} \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \text{ s})$ ;
- дебит за пристенно оросяване на колоната  $Q_0$ :  
-  $0.55 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $0.45 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $0.35 \text{ m}^3/\text{h}$ ;
- презареждания на пълнежа -  $3 \div 6$  пъти

## Метод за получаване на експерименталните данни

- обемен метод за измерване на локалните дебита  $Q_i$  в сегментите на събирателното устройство;

## Обработка на експерименталните данни

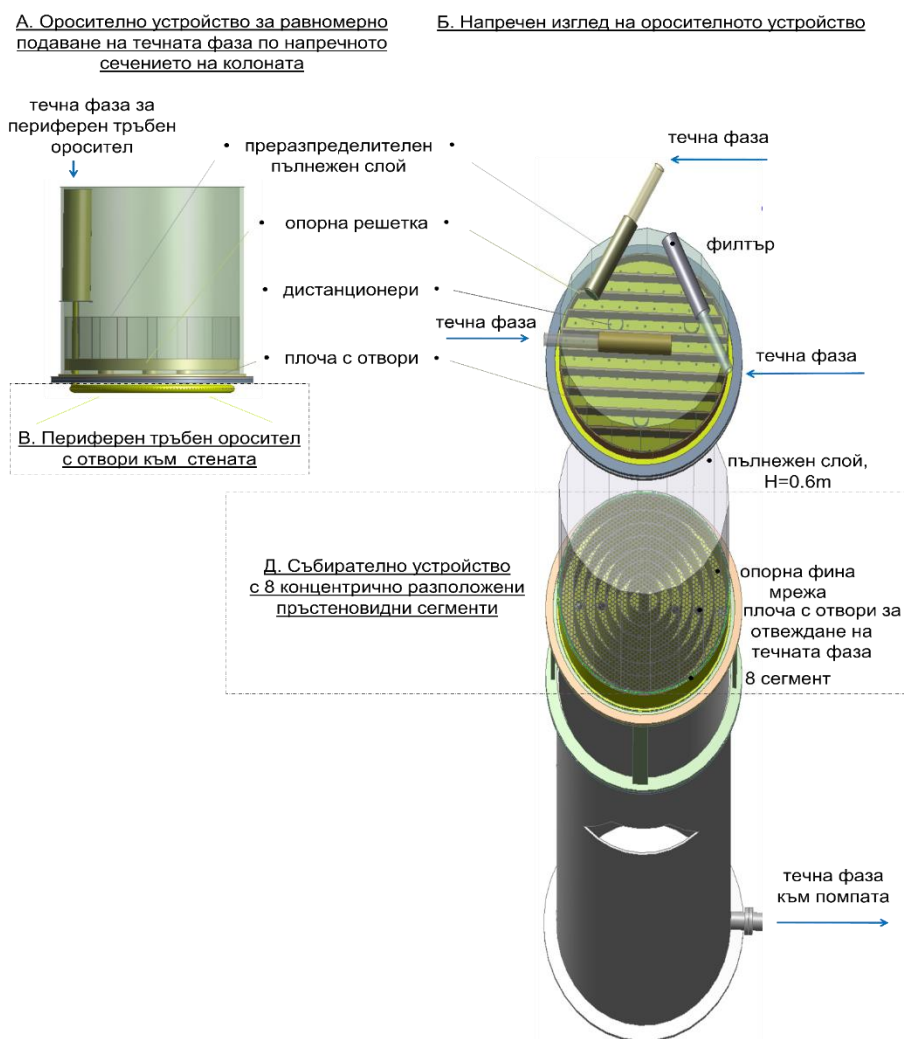
- систематизиране на данните;
- преизчисляване в безизмерна плътност на оросяване  $f$ ;
- представяне и анализ на резултатите;

Експерименталните данни са използвани и за изчисляване на някои от параметрите при математичното моделиране и за оценка на симулиране с CFD програма, представено в следващите две глави от дисертацията;

За целите на математичното моделиране в дисертацията са използвани експериментални данни за Pall rings пълнеж, Yin (1999).

### 3.2. Устройство на използваната полупромишлена колона с пълнеж

Изследванията са извършени в стоманена полупромишлена колона с диаметър  $D_c = 470\text{mm}$  с водопроводна вода подавана в горната част на колоната при стайна температура, Фиг. 2. Течната фаза преминава през оросителното устройство и равномерно се подава по напречното сечение над пълнежа в реактора. В пълнежният слой, течната фаза се преразпределя и на изхода се събира в колектор (събирателното устройство). Колоната с пълнеж разполага с резервоар за хранване и събиране на течната фаза от колектора. На Фиг. 2 за полупромишлената колона с пълнеж  $D_c = 470\text{ mm}$  е дадено оросителното устройство за равномерно подаване на течната фаза по напречното сечение на колоната с пълнеж (А), напречният изглед на оросителното устройство (Б), периферния тръбен оросител с отвори към стената на колоната (В) и събирателното устройство под пълнежа (Д).



Фиг.2 Компоненти на полупромишлената колона с пълнеж  $D_c = 470\text{ mm}$

## **Видове оросители, използвани при експерименталните изследвания**

Процесите в колони с пълнеж силно се влияят от началното разпределение на течността над пълнежният слой. Неравномерното разпределение може да доведе до намаляване на ефективността на масообмена с до 50%, Stichlmair & Stemmer (1987).

За постигане на поставените изследователски задачи, в хода на работа са използвани два типа оросители. Първият тип оросители са за равномерно подаване на течна фаза по напречното сечение на колоната. От първият тип оросители са използвани два самостоятелни оросителя, различаващи се по големината на отворите ( $d = 2.5 \text{ mm}$  и  $d = 5.2 \text{ mm}$ ). Това позволява безпроблемно начално натоварване на течната фаза в зададения диапазон. Вторият тип е периферен тръбен О-образен оросител с отвори към стената на колоната за равномерно подаване на течност в областта близо до стената.

В хода на работата, оросителят от първият тип с отвори  $d = 2.5 \text{ mm}$  претърпява три модификации до достигането на равномерно разпределение на течността по напречното сечение на колоната. Видовете оросители, техните означения и характерни различия са:

- 1) *МОМ1 - малък оросител с плоча с 61 броя отвори ( $350 \text{ бр/ m}^2$ ) с  $d = 2.5 \text{ mm}$ ;*
- 2) *МОМ2 – малък оросител с плоча с 61 броя отвори ( $350 \text{ бр/ m}^2$ ) с  $d = 2.5 \text{ mm}$  и преразпределителен слой от RSRM 1.5" с  $H = 0.250 \text{ m}$ ;*
- 3) *МОМ3 - малък оросител с плоча с 61 броя отвори ( $350 \text{ бр/ m}^2$ ) с  $d = 2.5 \text{ mm}$ , преразпределителен слой от RSRM 1.5" с  $H = 0.250 \text{ m}$  и 24 броя допълнителни отвори в периферната област;*
- 4) *ГОМ3 – голям оросител с плоча с 61 броя отвори ( $350 \text{ бр/ m}^2$ ) с  $d = 5.2 \text{ mm}$ , преразпределителен слой от RSRM 1.5" с  $H = 0.250 \text{ m}$  и 24 броя допълнителни отвори в периферната област;*
- 5) *ТПО – тръбен О – образен периферен оросител.*

Равномерното разпределение на течността по напречното сечение на колоната от оросителите е оценено и анализирано на основа на радиалния профил на разпределението на течната фаза при височина на пълнежният слой  $H = 0.15 \text{ m}$  в RSRM 1.5".

## Конструкция на събирателното устройство

Събирателното устройство се състои от 8 концентрично разположени цилиндри и е монтирано непосредствено под пълнежният слой. Над събирателното устройство е поставена тънка мрежа с отвори не влияещи на експериментите, с цел не пропадане на пълнежните елементи в зоната за събиране на течността, Фиг. 3

Върху фигурата на събирателното устройство са проектирани отворите на оросителя за равномерно подаване на течност по сечението на колоната от последната одобрена модификация.



Фиг.3 Събирателно устройство за течността с 8 концентрично разположени цилиндри с проекции на 85 броя отвори за оросяване за начално подаване на течната фаза по напречното сечение на колоната

За коректна оценка на получените експериментални резултати, се приема, че измерените дебити (плътности на оросяване) са получени при така наречения средноквадратичен радиус на събирателният цилиндър. Това е радиусът  $r_s$  отговарящ на две равни по площ части на събирателният цилиндър.

$$r_s = \sqrt{\frac{1}{2}(R_i^2 + R_{i-1}^2)}, \quad (1)$$

$R_i$  - вътрешен радиус на сектора;  $R_{i-1}$  - външен радиус на сектора.

В Табл. 1 са дадени площите на осемте сектора, средните квадратични радиуси за всеки сектор и съответните безизмерни стойности за радиусите и площите. При изчисленията, сегменти I и II са обединени, тъй като площите им са твърде малки в сравнение с площите на останалите сегменти. Важен сектор за изследването на стенният поток е сектор VII, където събраната течност е сума от потока в централната част на пълнежа и части от стенният поток. При анализ на изследванията е забелязано, че площта на сектора е твърде голяма за поставените задачи на математичното моделиране. Затова част от последните изследвания са с са монтирани две осево разположени разделящи пластини.

Последният VIII сектор непосредствено до стената на колоната е с ширина 5мм, което съответства на 4.21% от общата площ на събирателното устройство. Това разстояние се смята за подходящо за оценка на стенният поток.

Таблица. 1 Площ на осемте сектора, средните квадратични радиуси за всеки сектор и съответните безизмерни стойности за радиусите и площите.

Таблица 1

$R, m$	сектор	$r_s, m$	$r_s/R$	$F_i, m^2$	$F_i/F$
0.00	I	3.25E-02	1.38E-01	6.65E-03	3.83E-02
4.60E-02	II	6.28E-02	2.67E-01	1.15E-02	6.63E-02
	I+II	5.37E-02	2.29E-01	1.81E-02	1.05E-01
7.60E-02	III	9.17E-02	3.90E-01	1.65E-02	9.50E-02
1.05E-01	IV	1.21E-01	5.15E-01	2.26E-02	1.30E-01
1.35E-01	V	1.51E-01	6.41E-01	2.83E-02	1.63E-01
1.65E-01	VI	1.81E-01	7.69E-01	3.39E-02	1.96E-01
1.95E-01	VII	2.13E-01	9.07E-01	4.67E-02	2.69E-01
1.95E-01	VIIa	2.04E-01	8.69E-01	2.34E-02	1.35E-01
2.13E-01	VIIb	2.22E-01	9.44E-01	2.34E-02	1.35E-01
2.30E-01	VIII	2.33E-01	9.89E-01	7.30E-03	4.21E-02
2.35E-01	I+VIII		1.00E+00	1.73E-01	1.00E+00

\* Сектор VII е представен като два концентрично разположени цилиндъра с радиус  $r_s (VII/2) = 2.13 \times 10^{-1} m$  (VIIa и VIIb).

Размерите на цилиндрите и прилежащите им отвори за отвеждане на течността са съобразени с очакваните дебити и гарантират не преливане. Дебитът от цилиндрите се изчислява по обема на течността събрана за единица време.

### 3.3. Методика за получаване и обработка на получените данни

Случайната подредба на пълнежните елементи може да бъде представена като сложна прекъсната мрежа от тънка лента с характерна за пълнежа ширина, дължина и дебелина. За изследването на влиянието на случайната подредба на пълнежните елементи за разтичането на течната фаза, за всеки вид и размер на пълнежите са направени от 3 до 6 презареждания на пълнежният слой. В Табл. 2 е дадена обобщена информация за получените експериментални данни.

Таблица. 2 Обобщена информация за получените експериментални данни

Таблица 2

Експериментални данни [брой]	Вид пълнеж	Размер [inch]	Височина на слоя [m]	Презареждания [брой]	Вид оросител*	Начални дебити [брой]	Сегменти [брой]	Последователни измервания [брой]	Измерени локални дебити [брой]	
996 преди дисертацията	RSRM	0.7	0.6	3	МOM3	5	8	2	240	
	RSRM	0.7	0.6	3	ГОМ3	2	8	2	96	
	RSRM	0.7	0.6	3	ТПО	3	5	2	90	
	RSRM	1.5	0.15	1	МOM1	1	8	2	16	
	RSRM	1.5	0.15	1	МOM2	1	8	2	16	
	RSRM	1.5	0.15	1	МOM3	5	8	2	80	
	RSRM	1.5	0.15	1	ГОМ3	2	8	2	32	
	RSRM	1.5	0.15	1	ТПО	3	5	2	30	
	RSRM	1.5	0.6	3	МOM3	5	8	2	240	
	RSRM	1.5	0.6	3	ГОМ3	2	8	2	96	
	RSRM	1.5	0.6	2	ТПО	3	5	2	60	
	2712	RSRM	1.5	0.6	3	МOM3	5	9	2	270
		RSRM	1.5	0.6	3	ГОМ3	2	9	2	108
		RSRM	1.5	0.6	3	ТПО	3	6	2	108
RSRM		3	0.6	3	МOM3	5	8	2	240	
RSRM		3	0.6	3	ГОМ3	2	8	2	96	
RSRM		3	0.6	3	ТПО	3	5	2	90	
RSRP		0.6	0.6	5	МOM3	2	9	2	180	
RSRP		0.6	0.6	5	ГОМ3	1	9	2	90	
RSRP		0.6	0.6	5	ТПО	3	6	2	180	
RSRP		2	0.6	5	МOM3	2	9	2	180	
RSRP		2	0.6	5	ГОМ3	1	9	2	90	
RSRP		2	0.6	5	ТПО	3	6	2	180	
Ralu flow		1	0.6	5	МOM3	2	9	2	180	
Ralu flow		1	0.6	5	ГОМ3	1	9	2	90	
Ralu flow		1	0.6	5	ТПО	3	6	2	180	
Ralu flow		2	0.6	5	МOM3	2	9	2	180	
Ralu flow		2	0.6	5	ГОМ3	1	9	2	90	
Ralu flow		2	0.6	5	ТПО	3	6	2	180	

- Проведените експериментални изследвания в периода на дисертацията са част от Работен пакет 1 на договор № ДН 07-14/15.12.2016г., ФНИ



Всяко презареждане е изследвано при 7 типични за индустрията режими (напр. при ректификация и абсорбция) с начални плътности на оросяване  $L_0$ :  $3 \times 10^{-3} \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \text{ s})$ ,  $4 \times 10^{-3} \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \text{ s})$ ,  $5 \times 10^{-3} \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \text{ s})$ ,  $7 \times 10^{-3} \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \text{ s})$ ,  $9 \times 10^{-3} \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \text{ s})$ ,  $10 \times 10^{-3} \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \text{ s})$ ,  $12 \times 10^{-3} \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \text{ s})$  и са снети съответните експериментални данни за разпределението на течността по секторите на колектора  $L_i$ . Аналогично за всяко презареждане е подавана течност от пристенното оросяване с начални дебити  $Q_0$ :  $0.55 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $0.45 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $0.35 \text{ m}^3/\text{h}$  и са снети съответните експериментални данни  $Q_i$ . Преди започване на измерванията е осигурено достатъчно време за омокряне на пълнежните елементи.

За всяко индивидуално начално условие са направени по две последователни измервания на разпределението на течната фаза. Последователните измервания са направени през интервал от 20 мин.

Експерименталните данни са получени по обемен метод с измерване на локалните дебити. За целта е използвано събирателно устройство с 8 концентрично разположени цилиндри като във всеки от пръстеновидните цилиндри (сегменти/ сектори) е измерван обема на изтичащата се течност в мерителен съд за единица време.

Получените стойности на дебитите от двете последователни измервания са осреднени и преизчислени в плътност на оросяване, за всички сегменти на събирателното устройство, за анализ и оценка на разпределението на течността по напречното сечение на колоната (радиалният профил на течната фаза). Получените експериментални резултати са записани в електронни таблици изложени в приложението.

В следствие от получените плътност на оросяване от всички изследвания са изготвени анализи и са направени оценки на радиалното разпределение спрямо равномерното разпределение, осигуряващо максимална ефективност.

Получените експериментални данни са използвани при математично моделиране с традиционният три-параметричен дисперсионен модел, Staněk & Kolář (1965, 1968) за описание на разпределението на течна фаза в колона със съвременни насипни пълнежи с отворена структура.

Профилите на радиалната плътност на оросяване  $f$  и стенен поток  $f_{VIII}$  за RSRM 1.5" с височина на пълнежният слой  $H = 0.15 \text{ m}$  са използвани за сравнение на резултатите от симулирането с CFD програма на разтичане на течната фаза с постановка аналогична на експерименталната.

### 3.4. Оценка и анализ на началното разпределение на течността след оросителя посредством метални Raschig Super-Ring (RSRM) - размер 1.5", с височина на пълнежния слой $H = 0.15$ m

За оценка и анализ на различните модификации на оросителните устройства спрямо фактора на неравномерност  $M_f$  са използвани експерименталните данни за разпределението на течността в RSRM 1.5", при височина на пълнежния слой  $H=0.15$  m.

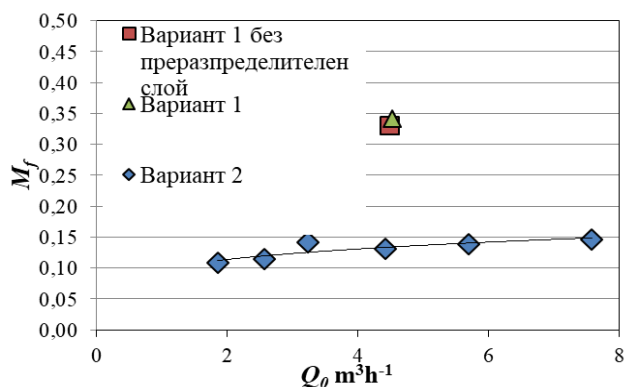
Фактора на неравномерност  $M_f$  е определен със следното уравнение:

$$M_f = \frac{1}{F_0} \sum_{i=1}^n F_i \left| \frac{L_i - L_0}{L_0} \right| \quad (2)$$

$M_f = 0$  - идеално равномерно разпределение,  $M_f = 2$  - възможно най-лошото разпределение на течната фаза в колони с пълнеж, Hanusch et al. (2018a).

На Фиг. 4 са представени резултатите за фактора на неравномерност  $M_f$  при Вариант 1 и Вариант 2.

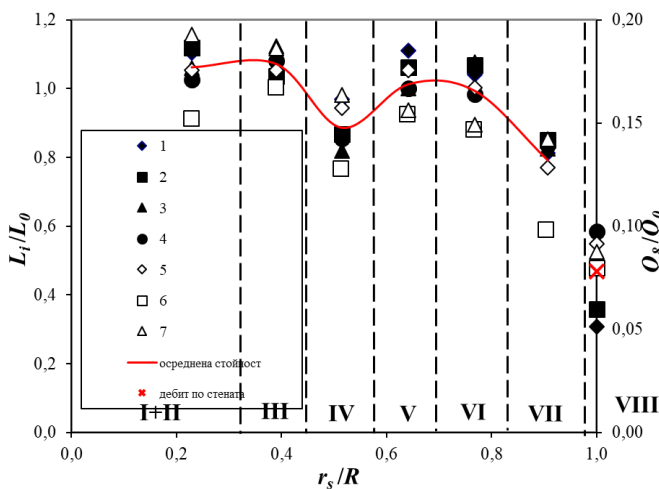
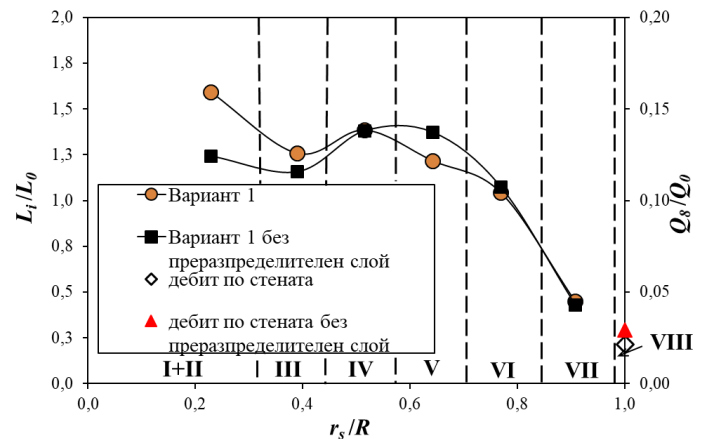
Фиг. 4 Сравняване на фактора на неравномерност  $M_f$ , след  $H=0.15$  m с RSRM 1.5'' при различните варианти на разпределителното устройство.



От Фиг. 4 се вижда, че стойностите за Вариант 1 на оросителят, с и без разпределителен слой (MOM1 и MOM2) са по-високи от тези за Варианта 2 (MOM3). Това ясно показва съществено значение на допълнителните 24 броя отвори в периферната област за осигуряването на равномерното подаване на течната фаза.

На Фиг. 5 и Фиг. 6 са показани разпределенията на течността по напречното сечение на колоната за Вариант 1 и Вариант 2 спрямо безизмерните радиуси на секторите на събирателното устройство  $r_s/R$ . На лявата ордината са стойностите на безизмерната плътност на оросяване  $L_i/L_0$ , където  $L_i$  е локалната плътност на оросяване в сектор  $i = 1 - 7$ ,  $L_0$  е началната плътност на оросяване. На дясната ординатна ос са стойностите на безизмерният степенен поток в последния VIII сектор  $Q_8/Q_0$  (до стената), който събира дебита на течността по стената и течният поток от пълнежа.

Фиг. 5 Разпределение на плътността на оросяване по сегменти и стенният поток - Вариант 1:  $L_0 = 7 \times 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{s})$  при  $H = 0.15 \text{ m}$  с RSRM 1.5.



Фиг. 6 Разпределение на плътността на оросяване за Вариант 2, при начални плътности на оросяване: 1- $L_0 = 3 \times 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{s})$ ; 2- $L_0 = 4 \times 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{s})$ ; 3- $L_0 = 5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{s})$ ; 4- $L_0 = 7 \times 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{s})$ ; 5- $L_0 = 9 \times 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{s})$ ; 6- $L_0 = 10 \times 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{s})$ ; 7- $L_0 = 12 \times 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{s})$ , в RSRM 1.5",  $H=0.15\text{m}$  и осреднените стойности.

На Фиг. 6 се вижда, че за Варианта 2 има стойностите за безизмерната плътността на оросяване са по-близки до идеалното разпределение равно на 1.

Въпреки направената проверка за максималните дебити за всеки цилиндър, се наблюдават непредвидени резултати в VII зона. Отклонението от средното разпределение е 10%, с изключение на зона VII, където отклонението достига 21%. Наблюдаваното отклонение се дължи на дискретната структура на пълнежа и на ограничената ширина на събирателните цилиндри. За целта са добавени две напречни пластини разположени между вътрешната и външната стена на цилиндъра, съвпадащи с линията на диаметъра на колоната представено в предходните описания.

### 3.5. Представяне и анализ на експериментални данни за *RSRM 1.5"*, $H = 0.6\text{ m}$ , при начално подаване на течна фаза по напречното сечение на колоната

Първите изследвания за *RSRM 1.5"*, с височина на пълнежния слой  $H = 0.6\text{ m}$  са проведени при седем начални натоварвания 1-7, с дебити отговарящи на следните плътности на оросяване: 1 -  $L_0 = 3 \times 10^{-3} \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \text{ s})$ ; 2 -  $L_0 = 4 \times 10^{-3} \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \text{ s})$ ; 3 -  $L_0 = 5 \times 10^{-3} \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \text{ s})$ ; 4 -  $L_0 = 7 \times 10^{-3} \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \text{ s})$ ; 5 -  $L_0 = 9 \times 10^{-3} \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \text{ s})$ ; 6 -  $L_0 = 10 \times 10^{-3} \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \text{ s})$ ; 7 -  $L_0 = 12 \times 10^{-3} \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \text{ s})$ , в рамките на едно презареждане. Пълнежът е презареждан шест пъти и посочените условия са повторени за всяко презареждане на пълнеж 1-6. След третото презареждане на пълнежа 4-6, сектор VII е разделен на две равни части (VIIa и VIIb) с напречни прегради. Експерименталните данни за новите сектори са сумирани при изготвените фигури. Получените данни за VIIa и VIIb ще бъдат използвани за бъдещо планирано математично моделиране, което не е обект на дисертацията.

При равномерно начално подаване на течността (означено с горен индекс „u“) получените експериментални данни за разпределение на течната фаза по напречното сечение на колоната в *RSRM 1.5"*, след височина на пълнежния слой  $H = 0.6\text{ m}$ , са представени с безизмерните плътности на оросяване  $f$  за секторите от I+II до VII на колектора (лява ордината) и с безизмерният дебит  $M^u$  за сектор VIII (дясна ордината), в съответствие с безизмерната радиална координата  $r$  ( $r_s / R$ ) (абсциса). С вертикални пунктирани линии са маркирани вътрешните и външните радиуси на събирателните цилиндри.

При равномерното начално подаване на течността, безизмерният дебита  $M^u (r_{i-1}, r_i)$  от сектор VIII е сума от дебита на стенният поток и дебита на течната фаза за сектора вследствие на разпределението на течността по напречното сечение в колоната:

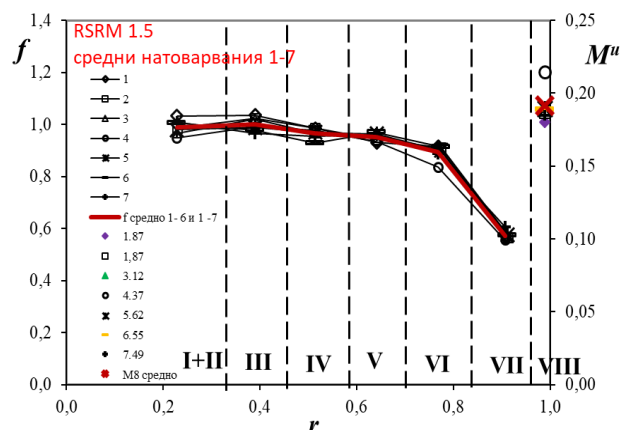
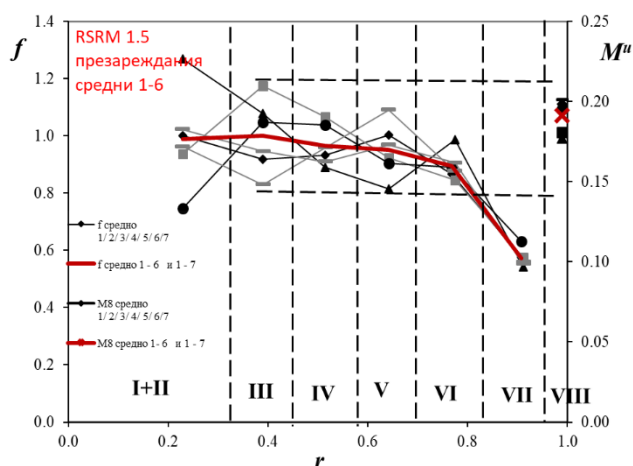
$$M^u(r_{i-1}, r_i) = \int_{r_{i-1}}^{r_i} r f^u dr \quad (3)$$

където  $i = 1 \div k$  ( $k$  - последния сегмент на събирателното устройство);

Величината  $M^u (r_{i-1}, r_i)$  е необходима за изчисляване на моделният параметър  $C$  (критерий за равновесно разпределение на поток между стената и пълнежа) в дисперсионният три-параметричен модел.

На Фиг. 7 и Фиг. 8 са представени обобщените данни на осреднените стойности за разпределението на течната фаза по напречното сечение на колоната за седемте натоварвания 1-7 и съответно за шестте презареждания на пълнежа 1-6.

*Фиг. 7 Сравняване на осреднените безизмерни плътности на оросяване  $f$  по секторите от I+II до VII и дебита  $M^u$  от последният VIII сектор при седемте начални плътности на оросяване 1-7; и осреднената стойност, отбелязана с червен цвят.*



*Фиг. 8 Сравняване на осреднените безизмерни плътности на оросяване  $f$  по секторите от I+II до VII и дебита  $M^u$  от последният VIII сектор, при шестте презареждания 1-6; и осреднената стойност, отбелязана с червен цвят.*

На Фиг. 7, осреднените стойности за разпределението на течната фаза по напречното сечение на колоната за седемте натоварвания 1-7 са близки по между си и близки до идеалното разпределение на течната фаза, т.е. потвърждава се, че началното натоварване слабо влияе върху разпределението на течната фаза.

На Фиг. 8 за шестте презареждания на пълнежа следва, че три от радиалните профили на течната фаза са с близка визия, два също следват обща визия и един е с профил различен от останалите.

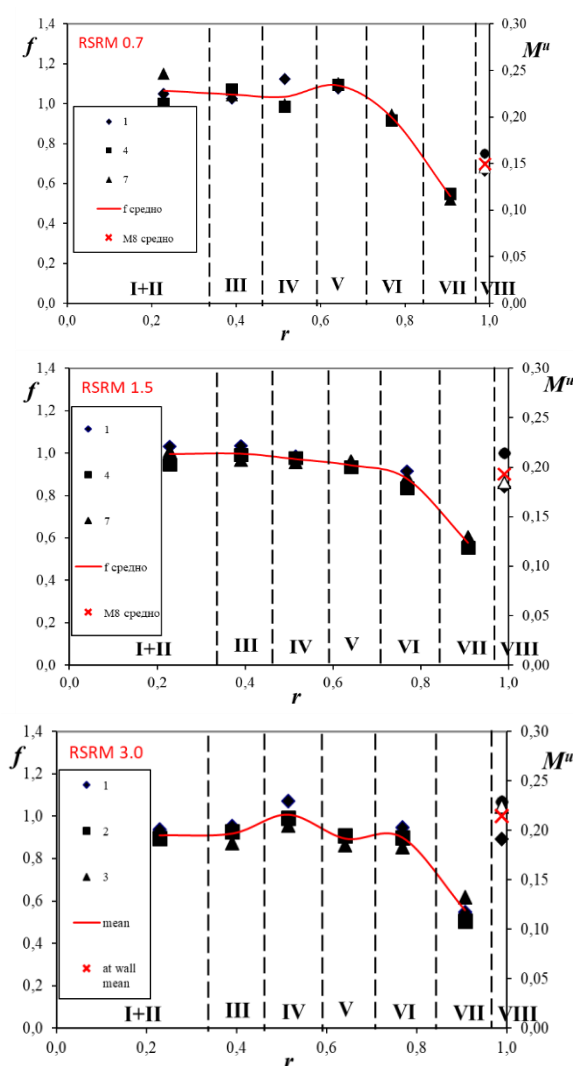
На Фиг. 8 се забелязва, че осреднените стойности за разпределението на течната фаза по напречното сечение на колоната за шестте презареждания, са с видими отклонения спрямо осреднената си стойност (червената крива), като отклоненията намаляват от I+II до VI сектор и в VII сектор са минимални. От друга страна разгледаните профили доста се отличават от идеалното разпределени на течната фаза, т.е. радиалния профил на плътността на оросяване зависи предимно от презарежданията на пълнежа.

**3.6. Представяне и анализ на експериментални данни за пълнежите: RSRM 0.7", RSRM 1.5", RSRM 3", RSRP 0.6", RSRP 2.0", Ralu Flow 1.0", Ralu Flow 2",  $H = 0.6\text{ m}$ , при равномерно начално подаване на течна фаза по напречното сечение на колоната**

След подробният анализ на експерименталните данни за RSRM 1.5" представен в предходното изложение, е решено, че използването само на трите начални плътности на оросяване (най-малката, средната и най-голямата за изследваният интервал) са достатъчни за анализите на получените резултати:  $L_0 = 3 \times 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{s})$ ,  $L_0 = 7 \times 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{s})$  и  $L_0 = 12 \times 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{s})$ . Представените резултати са от пет презареждания на пълнежите (изключение е RSRM 1.5" при 3 презареждания поради направените вече 3 презареждания в началния етап на изследванията) и с разделен на две половини събирателен цилиндър VII, означени като VIIa и VIIb.

На Фиг. 9 са представени разпределенията на течната фаза в пълнежите: RSRM 0.7", 1.5" и 3"; RSRP 0.6" и 2.0"; Ralu Flow 1.0" и 2.0",  $H = 0.6\text{ m}$

Фиг. 9 Разпределения на течната фаза в пълнежите: RSRM, RSRP Ralu Flow,  $H = 0.6\text{ m}$ , осреднени по презарежданията на пълнежа, представени с безизмерните плътности на оросяване  $f$  за секторите от I+II до VII и дебити  $M^u$  от сектор VIII, при равномерно подаване на течна фаза, с дебити отговарящи на следните начални плътности на оросяване: 1 -  $L_0 = 3 \times 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{s})$ , 4 -  $L_0 = 7 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{s})$ , 7 -  $L_0 = 12 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{s})$  (натоварвания 1, 4, 7); и съответните радиални профили на осреднените безизмерни плътности на оросяване  $f$ , както и осреднените безизмерни дебити, осредни по натоварванията (1, 4, 7), отбелязани с червен цвят.



От Фиг. 9 се вижда, че равномерно разпределение на течната фаза за секторите I–V, като в тази централна област, стойностите за безизмерните плътности на оросяване са близки до 1. Това е често срещано в колоните с големи размери, както се вижда и в Yin (1999) за диаметър на колоната  $D_c=0.6m$  и Hanusch et al. (2018a) за диаметър на колоната  $D_c=1.2m$ . При Staněk & Kolář, (1965, 1968) диаметъра на колоната  $D_c<0.5m$  и не се наблюдава равномерен централен участък.

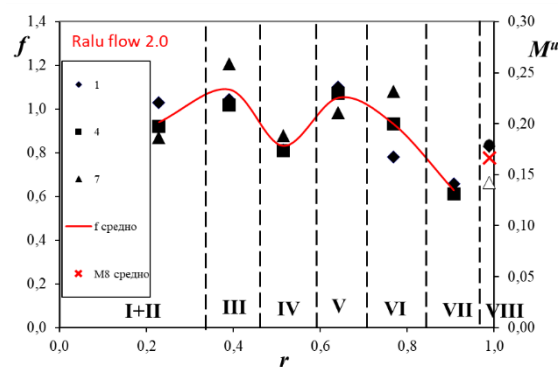
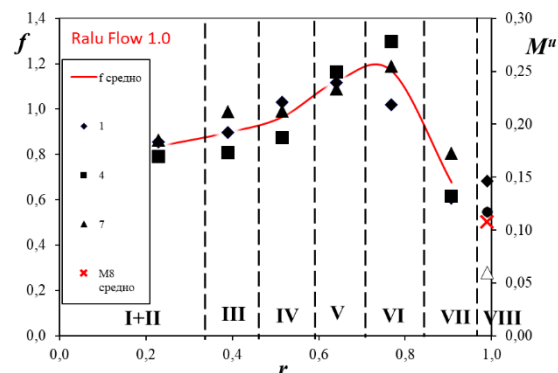
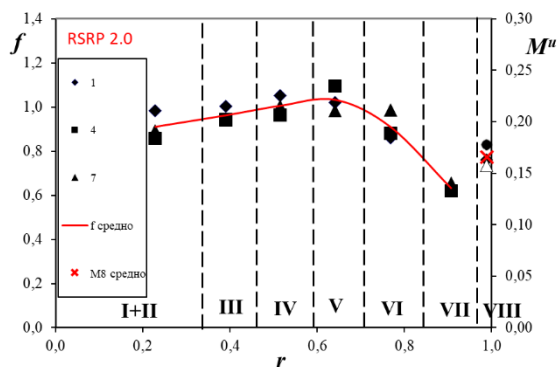
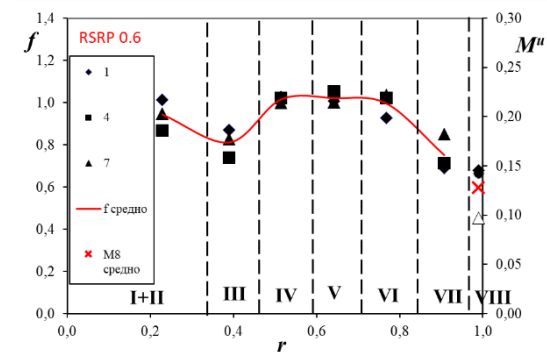
В периферната област, в близост до стената, както при секторите от VI до VIII на използваният колектор, се наблюдава неравномерност, дължаща се на разтичащата способност на пълнежа и на образуването на стенен поток. Тази особеност създава трудности при идентифицирането на параметрите на дисперсионният модел.

От Фиг. 9 се наблюдава, че увеличение на безизмерният дебит  $M^u$  с увеличаване размера на пълнежите до близо 50% за разгледаните Ralu Flow 1.0" и 2.0".

Анализите на получените експериментални данни показват относителни отклонения от средната стойност за RSRM - 0.7", 1.5", 3.0" и RSRP - 0.6", 2.0" до около 10%, и за Ralu Flow - 1.0", 2.0" пълнежи до 20%.

Осреднените стойности за безизмерната плътност на оросяване в RSRM - 0.7", 1.5", 3.0" показват: по-равномерно разпределение на течната фаза, по-малки отклонения по секторите, както и стойности по-близки до 1.

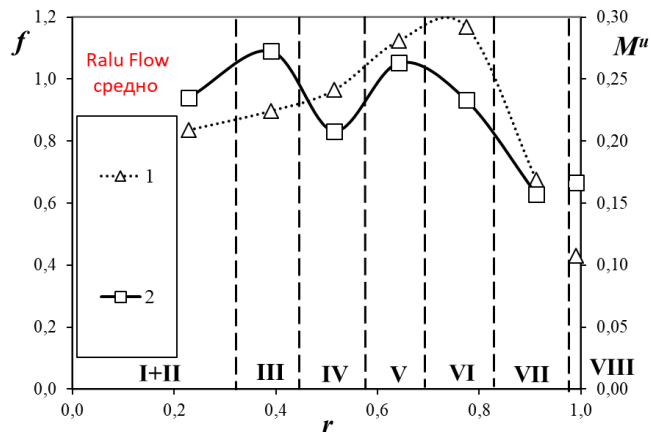
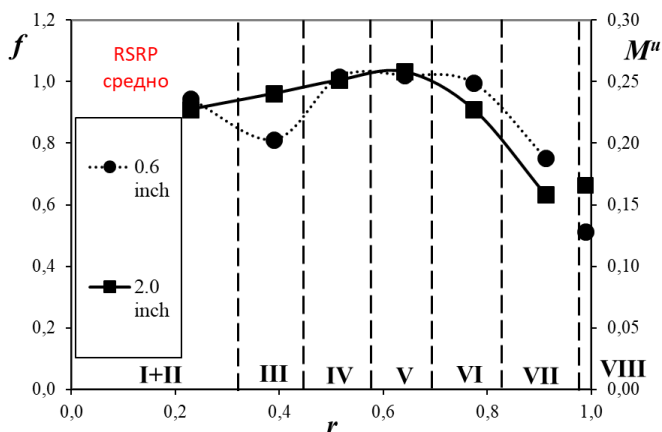
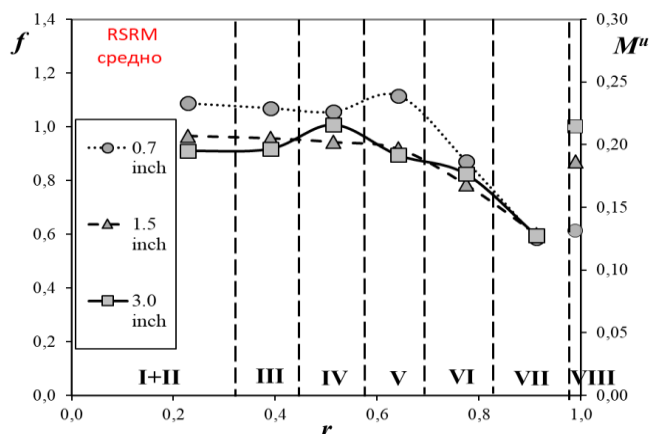
Установено е, че отклоненията са вследствие на презарежданията на пълнежа и в по-малка степен от началните плътности на оросяване.



**3.7. Представяне на обобщени данни за разпределението на течната фаза с осреднени стойности по видовете пълнежи - RSRM, RSRP, Ralu Flow,  $H=0.6m$ , при равномерно начално подаване на течна фаза по напречното сечение на колоната**

Обобщените експериментални данни, с осреднените стойности за всеки вид пълнеж - RSRM, RSRP, Ralu Flow, са дадени на Фиг. 10, при равномерно подаване на течността по напречното сечение на колоната както следва:

Фиг. 10 Обобщени експериментални данни, с осреднени стойности по начални натоварвания и презареждания за всеки вид пълнеж - RSRM, RSRP, Ralu Flow,  $H = 0.6 m$  и при равномерното подаване на течността по напречното сечение на колоната



От Фиг. 10 може да се обобщим, че има размери на пълнежи, които равномерно разпределят течната фаза в централната област на пълнежа като RSRM 1.5", RSRP 2.0" и Ralu Flow 2.0",  $H = 0.6 m$ .

Ясно се вижда установената зависимост, че при по-големите размери на пълнежа, безизмерните дебити  $M^u$  в последният VIII сектор са с по-голяма стойност.

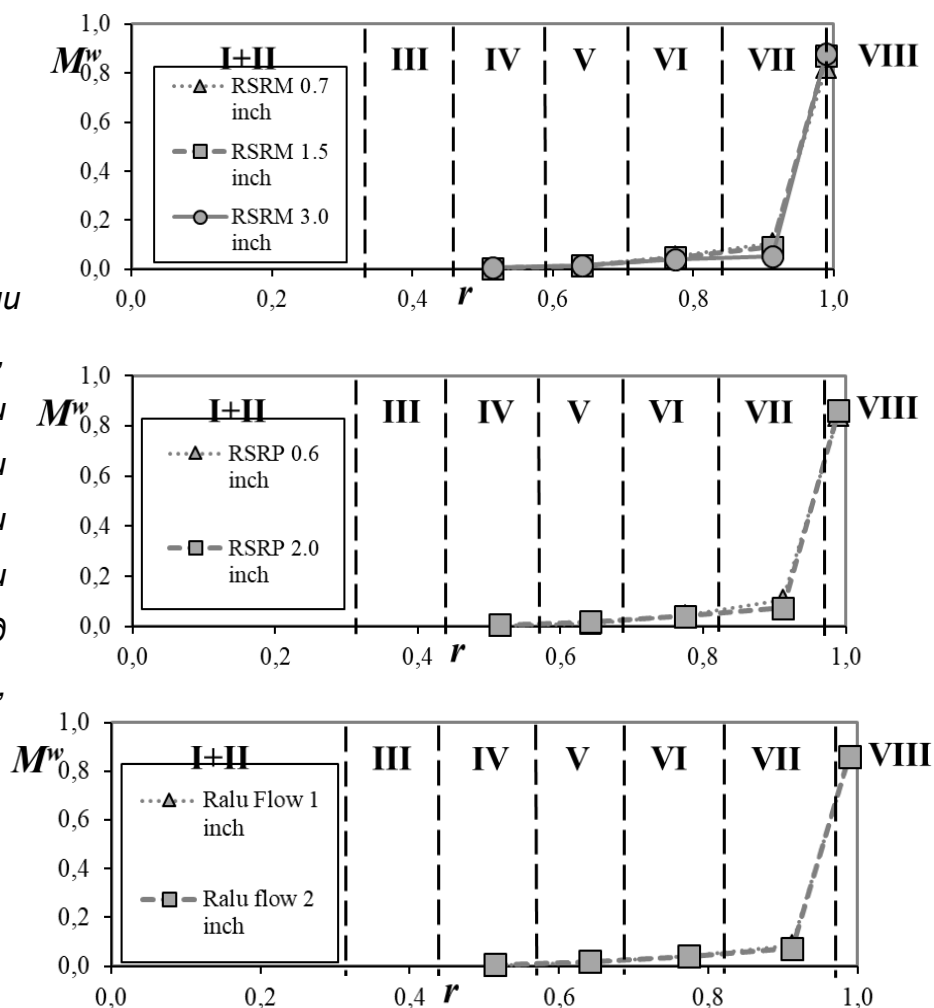


### 3.8. Представяне и анализ на експериментални данни за пълнежите: *RSRM 0.7"*, *1.5"* и *3"*, *RSRP 0.6"* и *2.0"*, *Ralu Flow 1.0"* и *2.0"*, $H = 0.6$ m при пристенно оросяване

При пристенно оросяване с отвори близо до стената и насочени към нея, е изследвано разпределението на течната фаза в *RSRM 0.7"*, *1.5"* и *3"*, *RSRP 0.6"* и *2.0"*, *Ralu Flow 1.0"* и *2"*, с височина пълнежният слой  $H = 0.6$  m, с три начални дебита: 1-  $Q_0^w = 0.35$  m<sup>3</sup>/h, 2-  $Q_0^w = 0.45$  m<sup>3</sup>/h, 3-  $Q_0^w = 0.55$  m<sup>3</sup>/h, в рамките на едно презареждане. Посочените условия са повторени за всяко презареждане на пълнеж 1- 5.

На Фиг. 11 са дадени обобщените експериментални данни, с осреднените стойности за всеки вид пълнеж - **RSRM**, **RSRP**, **Ralu Flow**, за пристенно оросяване:

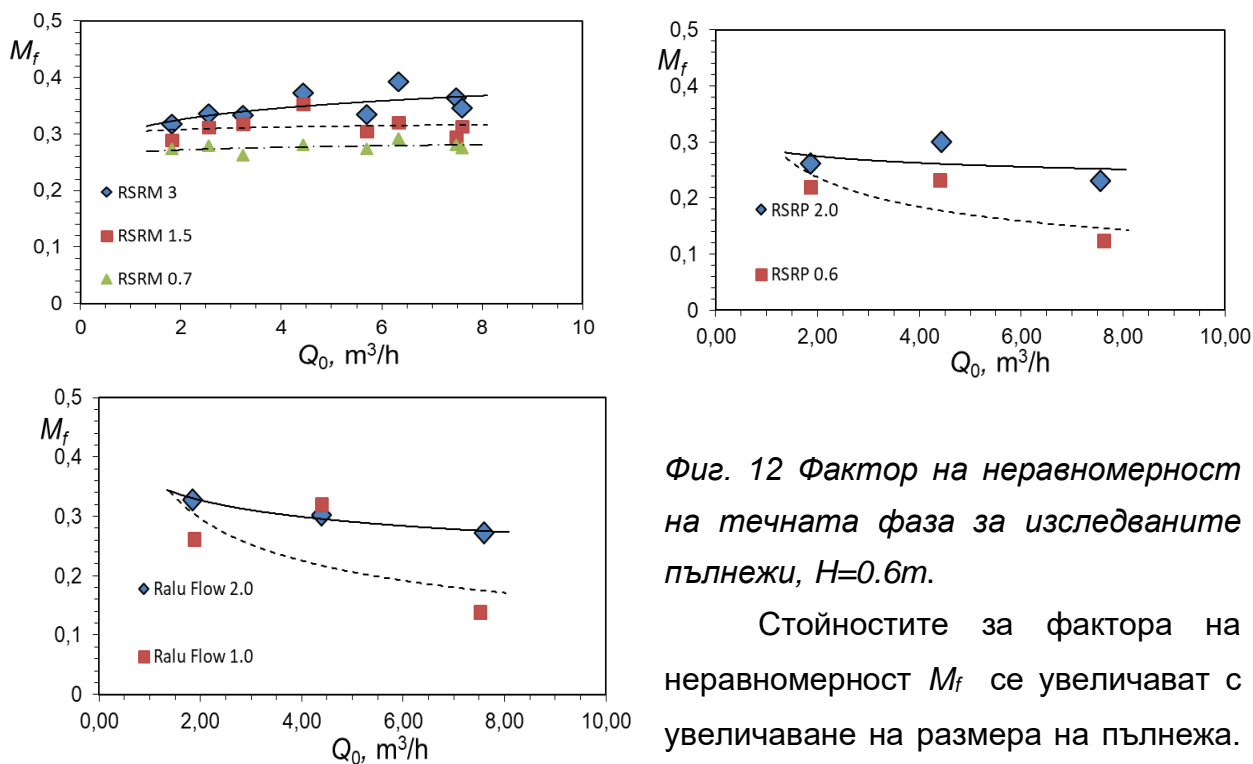
Фиг. 11 Обобщени експериментални данни, с осреднени стойности по начални натоварвания и презареждания, при пристенно, за всеки вид пълнеж - *RSRM*, *RSRP*, *Ralu Flow*,  $H = 0.6$  m



От фиг. 11 се наблюдава увеличение на дебита по стената с увеличаване на размерите на пълнежа, както и при оросяването по напречното сечение на колоната.

### 3.9. Оценка и анализ на разпределение на течността в различните пълнежи: RSRM 0.7", RSRM 1.5", RSRM 3", RSRP 0.6", RSRP 2.0", Ralu Flow 1.0", Ralu Flow 2" , H = 0.6 m посредством фактора на неравномерност $M_f$

На Фиг. 12 са представени факторите на неравномерност  $M_f$  на течната фаза за изследваните пълнежи.



Фиг. 12 Фактор на неравномерност на течната фаза за изследваните пълнежи,  $H=0.6m$ .

Стойностите за фактора на неравномерност  $M_f$  се увеличават с увеличаване на размера на пълнежа. Наблюденията за влиянието на размера на пълнежа върху стойностите на  $M_f$  е в съответствие с данните в Hanusch et al. (2018a), от 0.22 до 0.38 при индустриални условия за Rauschert Metal Saddle Rings (RMSR).

За RSRM пълнежи, особено за RSRM 3", както при Hanusch et al. (2018a) се наблюдава леко увеличаване на стойността на  $M_f$  с увеличаване на началното натоварване. За пластмасовите пълнежи: RSRP 0.6" и 2.0" и Ralu Flow 1.0" и 2" влиянието за дебита е точно обратното. При големият размер на пълнежа с увеличаване на началното натоварване фактора на неравномерност  $M_f$  слабо намалява. За по-малкия размер, фактора на неравномерност  $M_f$  при по-големите начални натоварвания също намалява, дори по-значително от големият размер на пластмасовият пълнеж. Причината, вероятно е, че пластмасовите пълнежи са изработени с по-дебела стена.

#### 4. МАТЕМАТИЧНО МОДЕЛИРАНЕ С ДИСПЕРСИОННИЯ МОДЕЛ ЗА РАЗПРЕДЕЛЕНИЕТО НА ТЕЧНАТА ФАЗА В КОЛОНИ С ПЪЛНЕЖ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ НА МОДЕЛНИТЕ ПАРАМЕТРИ

##### 4.1. Подходи за определяне на параметъра C

Изведени са две аналитични зависимости за определяне на параметъра C с експериментални данни от два типа начално оросяване и стенен поток включен в последният сегмент, дефиниран чрез радиусите  $(r_i, r_{i-1})$ ,  $i = 1 \div k-1$ :

$$C = \frac{M_i^w(r_i, r_{i-1})}{r_i^2 - r_{i-1}^2 - M_i^u(r_i, r_{i-1})} \quad (4)$$

$$C = \frac{1 - M_i^w(r_i, r_{i-1})}{M_i^u(r_i, r_{i-1}) - (r_i^2 - r_{i-1}^2)} \quad (5)$$

в последния сегмент на събирателното устройство  $i = k$ , където  $M_i^u$  и  $M_i^w$  са безизмерните дебити на течността, отчетени в съответните сегменти на събирателното устройство, съответно при равномерно и пристенно оросяване. Тези формули улесняват изчисляването на параметъра C и не се налага изработката на специално устройство за отвеждане на стенния поток.

Другата възможност да се определи параметъра C от експериментални данни е, когато са налични данни само за един вид начално оросяване, но за няколко височини на пълнежа, откъдето може да се прецени дали стенният поток е достигнал „уравновесяване“ с останалата част на потока извън пристенната зона. Тогава може да се използва приближение за C от моделните решения на Станек и Коларж за стенния поток ( $z \rightarrow \infty$ ):

$$W^u \Big|_{z \rightarrow \infty} = \frac{1}{1+C} - 2 \sum_{n=1}^{\infty} A_n^u(q_n) \frac{J_1(q_n)}{q_n} \exp(-q_n^2 z) \Big|_{z \rightarrow \infty} \cong \frac{1}{1+C} \quad \text{или,}$$

$$C \approx \frac{1 - W^u}{W^u} \quad (6)$$

Респективно за началното пристенно оросяване  $W^w$  формулата е аналогична.

## 4.2. Еднопараметрична идентификация

Алгоритъмът при еднопараметричната идентификация, включва намиране на минимума на остатъчната дисперсия  $S_A^2$  между експериментални и моделни стойности на плътността на оросяване при физически възможни стойности на  $B$  и проверка на адекватността на модела по критерия на Fisher.

Остатъчната дисперсия  $S_A^2$ , Kolář & Staněk (1965) при известни стойности за коефициента на разтичане  $D_r$  и на параметъра  $C$  се изчислява за всяка стойност от предварително избран интервал стойности на  $B$ :

$$S_A^2 = \frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k n_i (\bar{f}_{ie} - \bar{f}_{it})^2 \quad (7)$$

съответно  $\bar{f}$  се определя от израза:

$$\bar{f} = \frac{2}{R_2^2 - R_1^2} \int_{R_1}^{R_2} f(r, z) r dr, \quad (8)$$

където  $\bar{f}$ ,  $f_{ie}$ ,  $\bar{f}_{it}$  - средно интегралната безизмерна плътност на оросяване за съответния  $i$ -тият сегмент ( $i = 1 \div k$ ) на събирателното устройство, дефиниран чрез радиусите  $R_i$  и  $R_{i-1}$ ;

$e, t$  - индекси за експериментални и теоретични (по модела) стойности;

$n_i$  - броят на паралелните експерименти във всеки от сегментите;

Проверката на адекватността на модела по критерия на Fisher:

$$F = \frac{S_A^{2\min}}{S_0^2} < v_{1-\alpha}^2(m, m') \quad (9)$$

$$S_0^2 = \frac{1}{n-k} \sum_{i=1}^k (n_i - 1) S_i^2 \quad (10)$$

където  $v^2$ - разпределение със степени на свобода  $m = k-1$  и  $m' = n-k$  с вероятност  $1-\alpha^*$ ;

$S_0^2$  - дисперсия на възпроизводимост на експерименталните данни.

$S_i^2$  - дисперсиите във всеки от сегментите на събирателното устройство, изчислени като отклонения от средното за броя паралелни експерименти.

### 4.3. Резултати от еднопараметрична идентификация за RSRM 1.5"

- Тип пълнеж: метален Raschig Super-Rings - 1.5"  
Стойности на параметрите  $C$  – 0.981, Dzhonova et al. (2018a);

Стойност на параметъра  $D_r$  – 0.0024 m, Dzhonova et al. (2007) с трейсерен метод

Експериментални данни:

Таблица. 3 Средно интегрални експериментални плътности на оросяване и стенни потоци за пълнеж RSRM 1.5",  $D_c = 0.470$  m,  $H = 0.6$  m

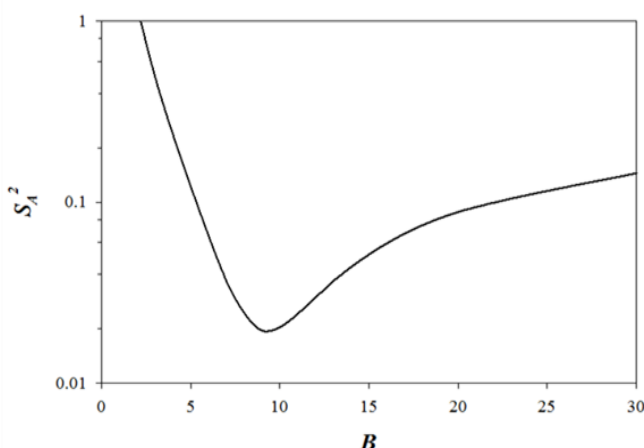
Таблица 3

Сегмент	I+II	III	IV	V	VI	VII	VIII*
$\bar{f}_{te}$	1.06	1.06	0.956	0.912	0.911	0.577	0.1793*
$\bar{f}_{it}$	0.9998	0.9978	0.9881	0.951	0.8486	0.6235	0.1827*
$\delta, \%$	6.0	6.2	-3.2	-4.1	7.3	-7.5	-2.0

\* Стойностите са изчислени на база дебита в сегмент 8 и стенния поток  $W^u$  при равномерно оросяване. Това е направено с цел да се намалят грешките, породени от относително малката площ на сегмент 8. С  $\delta$  е означена относителната грешка между моделните и експериментални стойности.

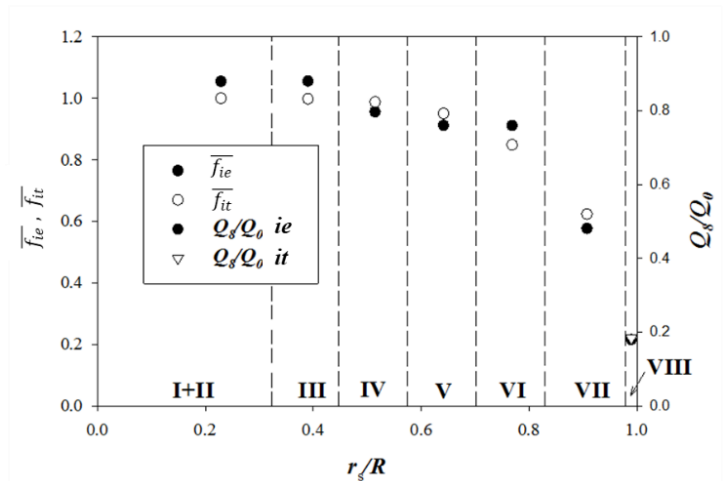
Резултатите от еднопараметричната идентификация на моделния параметър  $B$  и сравнението между модела и експеримента за пълнеж RSRM 1.5" са дадени на Фиг. 12 и Фиг. 13

Фиг. 12 Резултати от еднопараметричната идентификация на моделния параметър  $B = 9$ , с характерният минимум на остатъчната дисперсия  $S_A^2$ ;



За пълнежа RSRM 1.5" е установен минимум, при стойността за  $B = 9$ , както се вижда от Фиг. 12.

Фиг. 13 Сравнение между моделните и експерименталните плътности на оросяване и дебита в последният сектор VIII за пълнеж RSRM 1.5".



Съвпадението между експеримента и модела е много добро, както за плътностите на оросяване, така и за стенните потоци, Фиг. 13.

Проверена е адекватността между модела и експеримента за идентифицираните стойности на параметрите  $B = 9$ ,  $C = 0.9811$ ,  $D_r = 0.0024$  m. Минимална стойност на остатъчната дисперсия е  $\min(S_A^2) = 0.0107$  със степени на свобода  $m = k - 1 = 6$  и дисперсия на възпроизводимост на експеримента  $S_0^2 = 0.0299$  със степени на свобода  $m' = n - k = 14$ . При избрано ниво на значимост  $\alpha = 0.05$  моделът е адекватен по Fisher:

$$F = \frac{\min(S_A^2)}{S_0^2} = 0.357 < F(6, 14) = 2.85 \quad (11)$$

#### 4.4. Резултати от еднопараметрична идентификация с данни за метален Raschig Super-Rings, Dzhonova et al. (2017, 2018a)

- Тип пълнеж: метален Raschig Super-Rings - 0.7"  
Стойности на параметрите  $C = 0.630$ , Dzhonova et al. (2018a);  
Стойност на параметъра  $D_r = 0.00146$  m, Dzhonova et al. (2007), метода с единична струя
- Тип пълнеж: метален Raschig Super-Rings - 1.5"  
Стойности на параметрите  $C = 0.981$ , Dzhonova et al. (2018a);  
Стойност на параметъра  $D_r = 0.0022$  m, Dzhonova et al. (2007), метода с единична струя
- Тип пълнеж: метален Raschig Super-Rings – 3.0"  
Стойности на параметрите  $C = 1.541$ , Dzhonova et al. (2018a);  
Стойност на параметъра  $D_r = 0.00349$  m, Dzhonova et al. (2007), метода с единична струя.

Експерименталните данни са дадени в Таблица. 4.

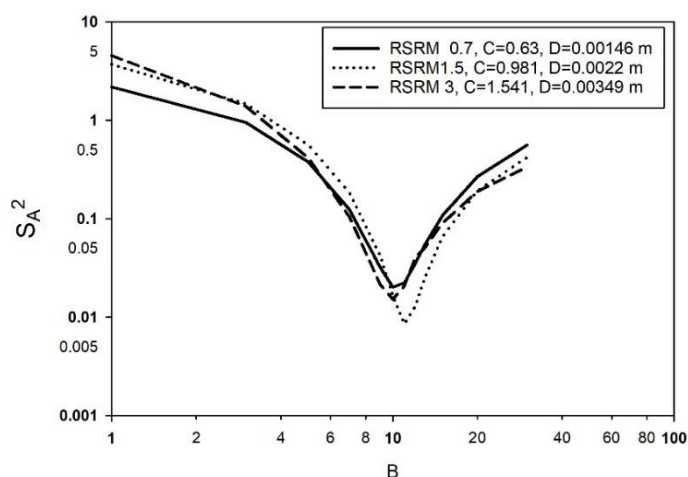
Таблица. 4 Експериментални средно интегрални плътности на оросяване в сегментите на събирателното устройство за метални RSRM 0.7", 1.5" и 3"

Таблица 4

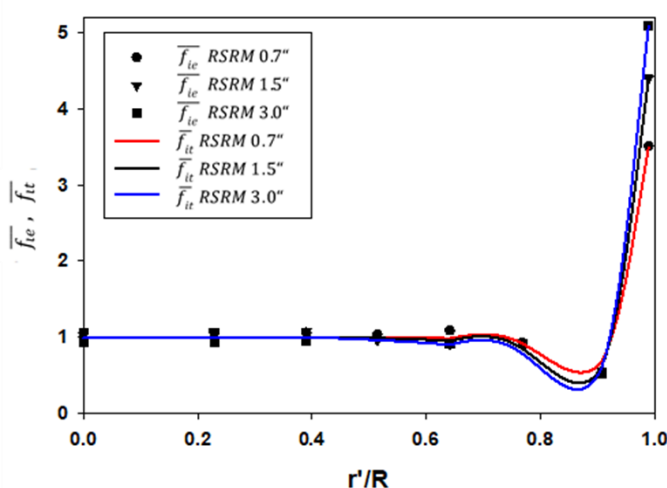
Сегменти	I + II	III	IV	V	VI	VII	VIII*
$F_i/F, \%$	10.5	9.5	13.0	16.3	19.6	26.9	4.2
$\bar{f}_{ie}, \text{RSRM } 0.7''$	1.06	1.06	1.04	1.09	0.93	0.539	3.51
$\bar{f}_{ie}, \text{RSRM } 1.5''$	1.07	1.07	0.962	0.912	0.898	0.564	4.40
$\bar{f}_{ie}, \text{RSRM } 3''$	0.928	0.948	1.01	0.910	0.914	0.521	5.09

Резултати от проведената еднопараметрична идентификация с диапазон на  $B=1 \div 30$ : за RSRM 0.7" и RSRM 3.0" са с минимум при стойността на  $B = 10$ , и за RSRM 1.5" са с минимум при стойността на  $B = 11$ , при  $\min(S_A^2) \approx 10^{-2} \div 10^{-3}$ , Фиг. 14

Фиг. 14 Резултати от еднопараметричната идентификация на моделния параметър  $B$  за RSRM 0.7" и RSRM 3.0" -  $B = 10$ , за RSRM 1.5" -  $B = 11$ , при  $\min(S_A^2) \approx 10^{-2} \div 10^{-3}$ .



Фиг. 15 Сравнение на резултатите от дисперсионния модел с експериментални резултати за метални пълнежи RSR 0.7", 1.5" и 3",  $H = 0.6$  m.



#### 4.5. Резултати от еднопараметрична идентификация с данни за метални Pall rings - 1", Yin (1999)

- Тип пълнеж: метални Pall rings - 1"

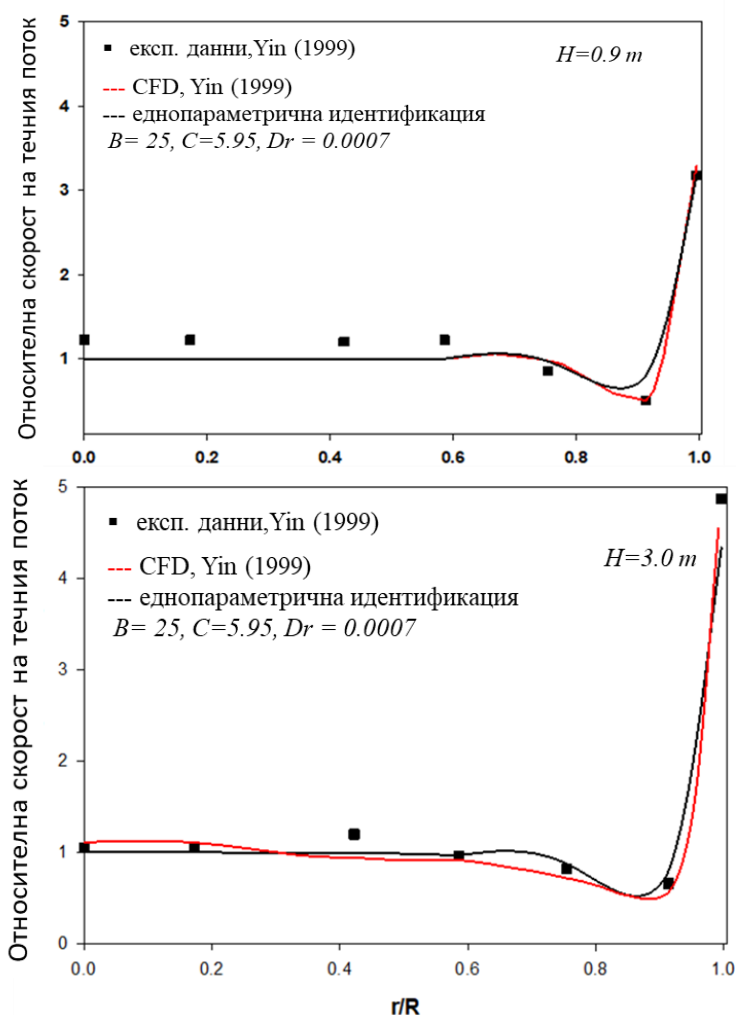
Стойност на параметрите  $C = 5.29$ , Yin (1999), от експериментални данни за стенния поток при различни височини на пълнежа;

Стойност на параметъра  $D_r = 0.0007$  m, Wen et al. (2001), моделна стойност.

Идентифицираната стойност на параметъра  $B$  по описаният алгоритъм е  $B = 25$ .

Фиг. 15 Сравнение на относителните скорости на течния поток в метални Pall rings - 1" от експерименталните стойности на относителната скорост на течния поток за височини на пълнежния слой  $H = 0.9$  m и  $H = 3.0$  m, с натоварвания по газ  $G = 0.75$  kg/m<sup>2</sup>s и течност  $L = 4.78$  kg/m<sup>2</sup>s в колона с диаметър  $D_c = 0.6$  m, черните квадратчета; CFD симулациите на Yin, с червена линия; и резултата от еднопараметричната идентификация за  $B=25$ ,  $C=5.95$  и  $D_r = 0.0007$  m, черна линия.

От Фиг. 15 се вижда, че дисперсионният модел е напълно сравним с CFD симулациите на Yin, като и двата модела предсказват много добре радиалният профил на течността спрямо и експерименталните данни на Yin. При по-ниските височини на пълнежния слой, радиалният профил на експерименталните данни в централната част на колоната все още е много близо до параболичния и се изравнява едва когато височината на слоя пълнеж стане достатъчно голяма. Вижда се, че дисперсионният модел и CFD симулацията много по-точно описват експерименталните данни при височина на слоя 3 m.



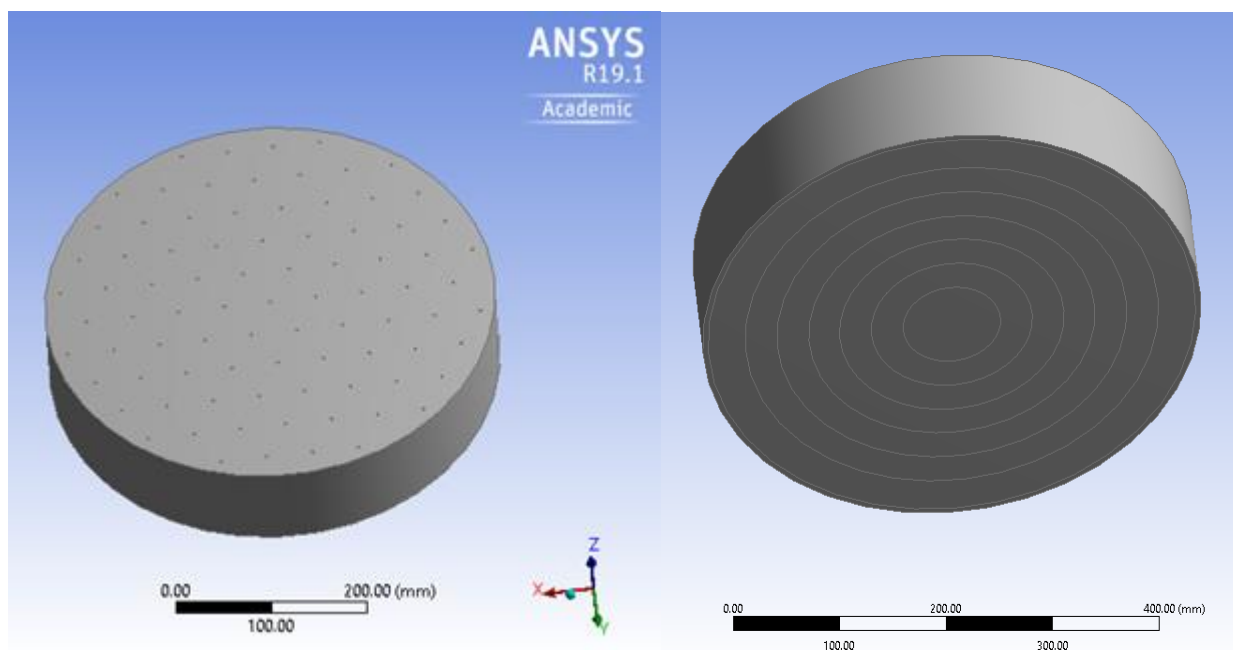


## 5. СТАРТИРАНЕ НА МАТЕМАТИЧНО СИМУЛИРАНЕ СЪС CFD ПРОГРАМА, ANSYS-FLUENT

### 5.1. Постановка на математичното симулиране със CFD програма

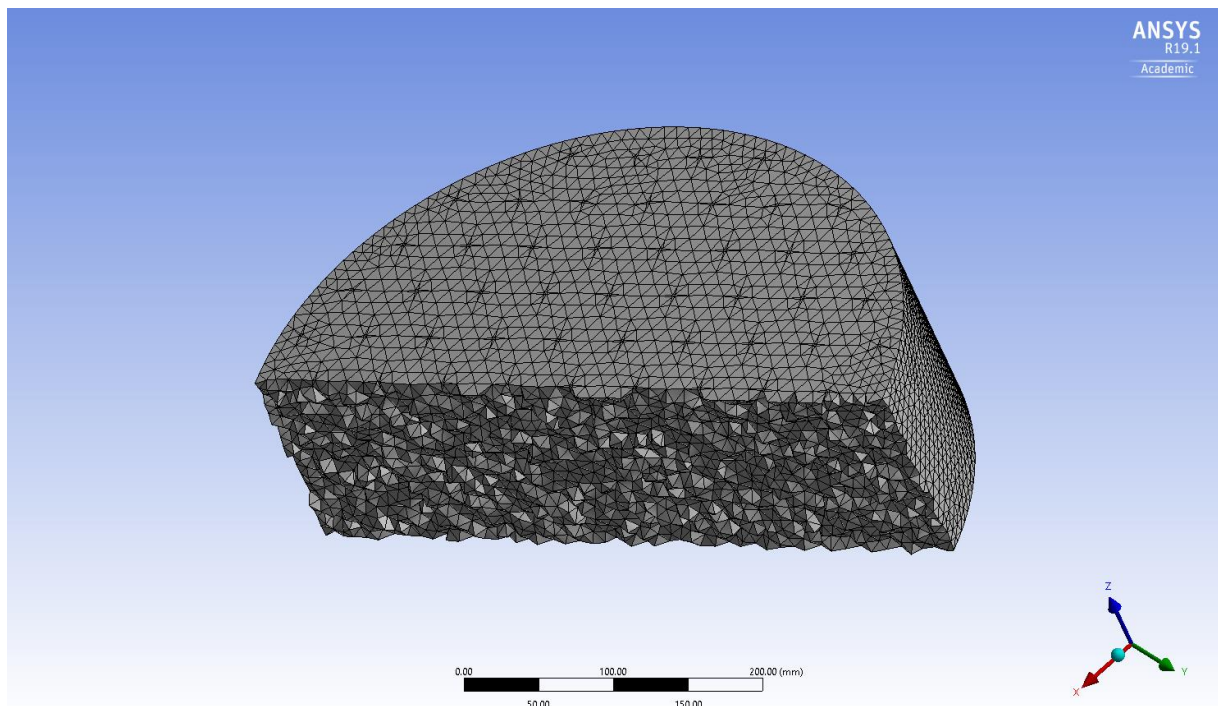
Екипът на ИИХ – БАН отдавна използва CFD програми като симулирането на колони с пълнеж е новаторска задача. След анализ на литературата по темата е взето решение за опит за 3D симулиране на експериментите за RSRM 1.5 ", за височина на пълнежния слой  $H = 0.15$  m.

Първа стъпка е изготвяне на графичен 3D модел, представляващ плътен цилиндър с височина  $H = 0.15$  m отговарящ на височината на изследваният слой. След това са нанесени отвори по горната повърхност, с размер и месторазположение, съответстващи на началното оросяване, Фиг. 16. При последващите изчисления, отворите за зададени като стартова повърхност за процесите, означена като inlet. Долната повърхност е разделена с концентрични кръгове, аналогично на събирателното устройство от експеримента, означени с outlet 1÷ 8.



Фиг.16 Графичен 3D модел с изглед на горната и долна повърхност

Втората стъпка е омрежването на модела. Ограничени от броя на елементите и сравнително сложната задача за 3D симулиране е избрано опростено омрежване заложено в програмата с максимален размер на елементите Max size 9 mm и елементи в обема 313788 броя, Фиг. 17



Фиг. 17 Графичен 3D омрежен модел на експеримента,  $H = 0,15 \text{ m}$

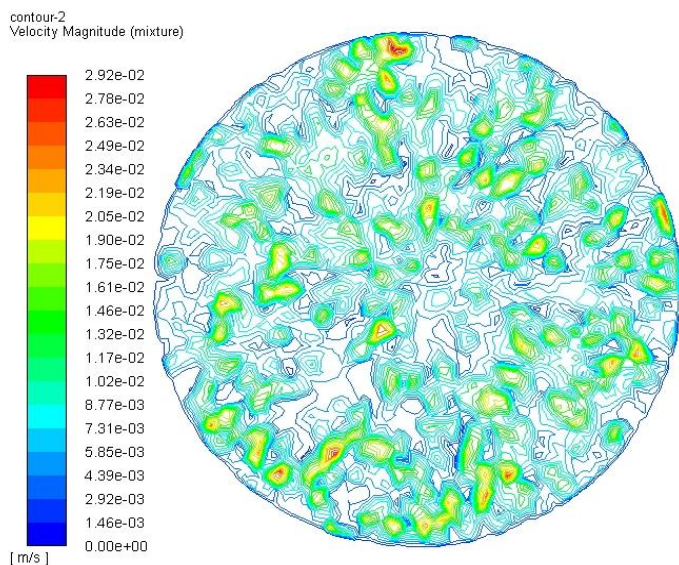
Последната стъпка е задаване на условията за изчисление (Fluent). Избрано е:

- Двухазен модел Volume of fluid (VOF)
- с осреднени по Рейнолдс уравнения на Навие – Стокс
- К- $\epsilon$  модел на турбулентността
- Гранични условия:
  - Вход течност (velocity inlet) - 2.2 m/s (равномерно разпределение)
  - Вход газ – pressure inlet
  - Изход - pressure outlet
- Скорост на фазите при стената 0 (Non-slip conditions)
- Hydraulic Diameter – 0.021 [m]
- Еднородна порьозна среда - 0.98 %

Water/Air:	Viscous Resistance	Inertial resistance
Direction – 1 (x)	50 000	65.6
Direction – 2 (y)	50 000	65.6
Direction – 3 (z)	50 000	65.6

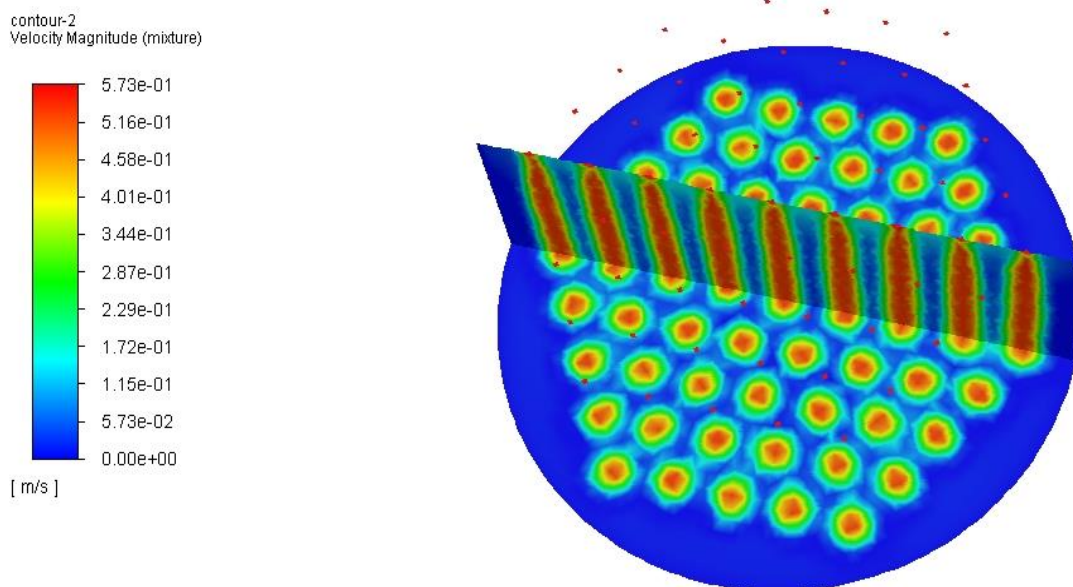
## 5.2. Резултати от математичното симулиране с методите на ANSYS - FLUENT

Решенията имат следният графичен вид, Фиг. 18:



Фиг. 18 CFD графичното решение за разпределение на скоростта в сечението на изход от колоната при RSRM 1.5",  $H = 0,15\text{ m}$

Вероятно поради по-големият размер на елементите от мрежата се оказва, че решението трупя грешки в течение на времето и окончателно решение не е постигнато.



Фиг. 19 Качествена картина с надлъжен разрез на пълнежния слой, в който се виждат отделните струйки, в RSRM 1.5 ",  $H = 0.15\text{ m}$ ,  $L_0 = 3 \times 10^{-3}\text{ m}^3 / (\text{m}^2 \text{ s})$ .

Полученото качествено съответствие с експеримента, като резултат дава възможност за визуализация на течението, чрез разпределението на скоростта в целия обем на пълнежния слой.

## ПРИНОСИ ОТ ИЗВЪРШЕНАТА ИЗСЛЕДОВАТЕЛСКА ДЕЙНОСТ

1) Предложени са конструктивни решения за усъвършенстване на устройствата за подаване (оросители) и измерване на разпределението (колектор) на течната фаза на полупромишлената експериментална инсталация, осигуряващи качествено експериментално изследване на течната фаза в колони с пълнеж;

2) Получена е база от експериментални данни за разпределението на течна фаза (водопроводна вода) в пилотна инсталация за следните високоефективни ненаредени пълнежи с отворена към потока структура: *метални Raschig Super-Ring (RSRM) с размери 0.7", 1.5" и 3"*, *пластмасови Raschig Super-Ring с размери 0.6" и 2" (RSRP) и Ralu-Flow с размери 1" и 2"*, с височина на пълнежният слой  $H = 0.6 \text{ m}$ , при равномерно оросяване с начални плътности на оросяване:  $L_0 = 3 \times 10^{-3} \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \text{ s})$ ;  $L_0 = 4 \times 10^{-3} \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \text{ s})$ ;  $L_0 = 5 \times 10^{-3} \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \text{ s})$ ;  $L_0 = 7 \times 10^{-3} \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \text{ s})$ ;  $L_0 = 9 \times 10^{-3} \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \text{ s})$ ;  $L_0 = 10 \times 10^{-3} \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \text{ s})$ ;  $L_0 = 12 \times 10^{-3} \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \text{ s})$  и при пристенно оросяване с дебит в диапазона:  $Q_0 = 0.3 - 0.55 \text{ m}^3 / \text{h}$ ;

3) Установено е, че радиалния профил на плътността на оросяване в изследваните пълнежи, след височина на пълнежният слой  $H = 0.6 \text{ m}$ , зависи предимно от презарежданията и слабо се влияе от началните плътности на оросяване;

4) Оценена и анализирана е неравномерността на разпределение на течната фаза, за изследваните пълнежи при височина на пълнежният слой  $H = 0.6 \text{ m}$  посредством фактора на неравномерност  $M_f$ .

5) Изведени са две нови аналитични зависимости за определяне на параметъра  $C$  от дисперсионния модел за колони с пълнеж спрямо безизмерната плътността на оросяване  $f$ : 1) при наличие на данни за разпределение на течната фаза, при равномерно оросяване по напречното сечение на колоната и пристенно оросяване, при дадена височина на пълнежният слой; и 2) при наличие на данни за разпределение на течната фаза, при равномерно оросяване по напречното сечение на колоната и няколко различни височини на слоя;

6) Определен е моделният параметър  $B$  от традиционният три параметричен дисперсионен модел, чрез идентификация по минимума на остатъчната дисперсия между моделните и експерименталните данни по радиуса

на колоната, за пълнежи метални Raschig Super-Ring (RSRM) с размери 0.7", 1.5" и 3", както и за метални Pall rings с размер 1" с данни на Yin (1999);

7) Получените моделни резултати за радиалното разпределение в колона с диаметър  $D_c = 0.470 \text{ m}$  за Raschig Super-Ring (RSRM) с размери 0.7", 1.5" и 3" са сравнени с експерименталните данни. Моделните резултати за Pall rings за радиалното разпределение в колона с диаметър  $D_c = 0.6 \text{ m}$  са сравнени със съответните експериментални данни и CFD резултати на Yin (1999). И в двата случая се наблюдава много добро съвпадение;

8) Показан е пример за прилагане на техниките за моделиране със CFD програма за 3D визуализация на течението на потоците, в съответствие с експеримент за RSRM 1.5" пълнеж, с височина на пълнежният слой  $H = 0.15 \text{ m}$  и начална плътност на оросяване  $L_0 = 3 \times 10^{-3} \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \text{ s})$ .

Смята се, че научните резултати от настоящите експериментални и теоретични изследвания в тази дисертация ще бъдат принос както към попълването на експерименталната база данни и моделирането на хидродинамиката в колони с високо ефективни ненаредени пълнежи, така и ще е принос към световният стремеж за ефективност на процеси.

## ОСНОВНИ ОЗНАЧЕНИЯ

- $B$  - критерий за обмен на течност между стената на колоната и пълнежа;
- $C$  - равновесното разпределение на течният поток между стената и пълнежа;
- $D_c$  - диаметър на колоната [m];
- $D_r$  - коефициент на разтичане [m];
- $F$  - напречно сечение [m<sup>2</sup>];
- $F$  – критерия на Fisher;
- $F_i$  - напречно сечение на  $i$ -тият сегмент на събирателното устройство [m<sup>2</sup>];
- $\bar{f}$  - средно интегралната безизмерна плътност на оросяване на  $i$ -тият сектор;
- $\bar{f}_{ie}$  - средно интегралната безизмерна плътност на оросяване за съответния  $i$ -тият сегмент за експериментални и теоретични (по модела) стойности;
- $\bar{f}_{it}$  - средно интегралната безизмерна плътност на оросяване за съответния  $i$ -тият сегмент за теоретичните (по модела) стойности;
- $f$  - безизмерна плътността на оросяване;
- $H$  - височина на пълнежният слой [m];
- $i$  - брой на колекторните цилиндри;
- $k$  - последния сегмент на събирателното устройство [брой];
- $L_0$  - начална плътност на оросяване [m<sup>3</sup>/ (m<sup>2</sup>s)];
- $L_i$  - локална плътност на оросяване на  $i$ -тият колекторен цилиндър [m<sup>3</sup>/ (m<sup>2</sup>s)];
- $M_f$  - фактор на неравномерност;
- $M_i^u$  - безизмерните дебити в сегменти на събирателното устройство при равномерно начално оросяване
- $M_i^w$  - безизмерните дебити в сегменти на събирателното устройство при равномерно пристенно оросяване
- $n = \sum_{i=1}^k n_i$  - брой на всички експерименти;
- $n_i$  -  $i$ -тият паралелен експеримент;
- $Q_0$  - общият дебит на течността с площ на напречното сечение на колоната  $F_0$  [m<sup>3</sup>/h];
- $Q_i$  - локален дебит на течността от  $i$ -тият колекторен цилиндър с площ  $F_i$  [m<sup>3</sup>/h];
- $R$  - радиус на колоната [m];
- $R_i$  - вътрешен радиус на сегментите от събирателното устройство [m];
- $R_{i-1}$  - външен радиус на сегментите от събирателното устройство [m];
- $r$  - безизмерен радиус на колоната;
- $r_s$  - средно квадратичен радиус [m];
- $S$  - площ на напречното сечение [m<sup>2</sup>];
- $S_A^2$  - остатъчната дисперсия;
- $S_{\delta w}$  - площ на последният периферен сектор [m<sup>2</sup>];
- $S_0^2$  - дисперсията на възпроизводимост на експерименталните данни;
- $S_i^2$  - дисперсиите във всеки сегментите на събирателното устройство;

$W^*$  - безизмерни начални потоци при стената за съответният тип оросяване;

$W^{*,u}$  - безизмерни стенни потоци при равномерно подаване на течност;

$W^{*,w}$  - безизмерни стенни потоци с подаване на течност в областта при стената;

$z$  - безизмерна височина на пълнежният слой;

#### ГРЪЦКИ СИМВОЛИ

$\delta$  - относителната грешка между моделните и експериментални стойности [%];

$\delta_w$  - размера на последният периферен сектор [mm];

$\nu^2$  - разпределение със степени на свобода  $m=k-1$  и  $m'=n-k$  с вероятност  $1-\alpha^*$ ;

$\sigma^2$  - остатъчна дисперсия;

#### ИНДЕКСИ

$e$  - индекси за експериментални стойности;

$t$  - индекси за теоретични стойности;

$u$  - равномерно начално оросяване;

$w$  - пристенно начално оросяване;

#### СЪКРАЩЕНИЯ

IMTP - Impulse Metal Tower Packing;

RSRM - метални Raschig Super-Ring пълнежи

RSRP - пластмасови Raschig Super-Ring пълнежи

MOM1 - малък оросител с плоча с 61 бр. отвори (350 бр/ m<sup>2</sup>) с  $d = 2.5$  mm;

MOM2 - малък оросител с плоча с 61 бр. отвори (350 бр/ m<sup>2</sup>) с  $d = 2.5$  mm и преразпределителен слой от RSRM 1.5" с  $H = 0.250$  m;

MOM3 - малък оросител с плоча с 61 броя отвори (350 бр/ m<sup>2</sup>) с  $d = 2.5$  mm, преразпределителен слой от RSRM 1.5" с  $H = 0.250$  m и 24 броя допълнителни отвори в периферната област;

ГОМ3 - голям оросител с плоча с 61 броя отвори (350 бр/ m<sup>2</sup>) с  $d = 5.2$  mm, преразпределителен слой от RSRM 1.5" с  $H = 0.250$  m и 24 броя допълнителни отвори в периферната област;

ТПО - тръбен О – бразен периферен оросител.

## Литература

Dzhonova-Atanasova, D., Kolev, N., & Nakov, S. (2007). Determination of liquid radial spreading coefficients of some highly effective packings. *Chemical Engineering & Technology: Industrial Chemistry - Plant Equipment - Process Engineering - Biotechnology*, 30(2), 202-207. doi.org/10.1002/ceat.200600327

Dzhonova-Atanasova, D., Petrova, T., Semkov, K., Darakchiev, S., Stefanova, K., Nakov, S., & Popov, R. (2018). Experimental Investigation of Liquid Distribution in Open-structure Random Packings as a Basis for Model Refinement. *Chemical Engineering Transactions*, 70, 2077-2082.

Hanusch, F., Engel, V., Kender, R., Rehfeldt, S., & Klein, H. (2018a). Development and Application of the TUM-WelChem Cell Model for Prediction of Liquid Distribution in Random Packed Columns. *Chemical Engineering Transactions*, 69, 739-744. doi.org/10.3303/CET1869124

Kolář, V., & Staněk, V. (1965). Distribution of liquid over random packing. *Collection of Czechoslovak Chemical Communications*, 30(4), 1054-1059. doi.org/10.1135/cccc19651054

Semkov, Kr., Petrova, T., & Moravec, P. (2000). Parameters identification of a mathematical model for liquid distribution in packed-bed columns. *Bulgarian Chemical Communications*, 32(3/4), 497-516.

Staněk, V., & Kolář, V. (1968). Distribution of liquid over a random packing. IV. Verification of the boundary condition of liquid transfer between a packed bed and the wall of a cylindrical column, and evaluation of its parameters. *Collection of Czechoslovak Chemical Communications*, 33(4), 1062-1077. doi.org/10.1135/cccc19681062

Stichlmair, J., & Stemmer, A. (1987). Influence of maldistribution on mass transfer in packed columns. *Inst. Chem. Eng. Symp. Ser* (104), 213-224.

Wen, X., Shu, Y., Nandakumar, K., & Chuang, K. T. (2001). Predicting liquid flow profile in randomly packed beds from computer simulation. *AIChE Journal*, 47(8), 1770-1779. doi.org/10.1002/aic.690470809

Yin, H. (1999). *Liquid maldistribution and mass transfer efficiency in randomly packed columns*. PhD Thesis, Edmonton, Alberta, Canada.



## Публикации на научни резултати по темата на дисертацията:

### Статии:

1. Petrova T., Stefanova K., Dzhonova-Atanasova D. & Semkov K. (2017). Modeling of liquid spreading in randomly packed metal Pall rings. *Mathematical Modeling*, 1, 4, 174-177.
2. Dzhonova-Atanasova, D., Petrova, T., Semkov, K., Darakchiev, S., Stefanova, K., Nakov, S., & Popov, R. (2018). Experimental Investigation of Liquid Distribution in Open-structure Random Packings as a Basis for Model Refinement. *Chemical Engineering Transactions*, 70, 2077-2082.
3. Dzhonova-Atanasova, D., Semkov, K., Petrova, T., Darakchiev, S., Stefanova, K., Nakov, S., & Popov, R. (2018). Liquid distribution in a semi-industrial packed column-experimental and theory. *Food Science and Applied Biotechnology*, 1(1), 19-25.

### Цитати:

Hanusch, F., Kender, R., Engel, V., Rehfeldt, S., & Klein, H. (2019). TUM–WelChem cell model for the prediction of liquid distribution in random packed columns. *AIChE Journal*, 65(8).

### Резюмета и постерни съобщения:

1. Стефанова, К., Д. Джонова-Атанасова, Т. Петрова. Създаване и изследване на нови пълнежи за процеси, свързани с опазване на околната среда. Юбилейна младежка научна сесия "Младите и Химията" - 30 г., 08.11.2016, София, ИИХ - БАН
2. Dzhonova D., T. Petrova, K. Semkov, K. Stefanova. Semi- industrial packed column for investigation of liquid phase distribution in high performance packings, 25ans Filière francophone "Génie chimique et biochimique", 27-29.09.2017, Sofia, Bulgaria, p. 29
3. Dzhonova D., Kr. Semkov, T. Petrova, S. Darakchiev, K. Stefanova, Sv. Nakov, R. Popov., Liquid distribution in a semi-industrial packed column - experimental and theory. 64th Scientific Conference with International Participation "Food Science, Engineering and Technology", 20-21.10.2017, Plovdiv, Bulgaria, III, p. 21
4. Dzhonova-Atanasova, D., Kr. Semkov, T. Petrova, S. Darakchiev, K. Stefanova, Sv. Nakov, R. Popov., Experimental study of liquid spread in modern random packings addressing mathematical model parameters' identification. Workshop: "From active matter to complex fluids", 8-10.01.2018, Nice, France
5. Dzhonova-Atanasova, D., T. Petrova, Kr. Semkov, S. Darakchiev, K. Stefanova, Sv. Nakov, R. Popov., Experimental Investigation of Liquid Distribution in Openstructure Random Packings as a Basis for Model Refinement. *Chemical Engineering Transactions*, Vol. 70, 2077-2082, 2018, PRESS 2018, Praha, Czech Republic
6. Stefanova, K., D. Dzhonova-Atanasova, T. Petrova. Liquid distribution in random high performance packings. 23rd Polish Conference of Chemical and Process Engineering, Warsaw, Poland 2-5 June 2019, p. 163

### Тезата:

Стефанова, К. (2017). Приложение и внедряване на нови пълнежи за процеси, свързани с опазване на околната среда. ИИХ – БАН, София