

инж. Живко Иванов Иванов

КИНЕТИЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ НА РЕКТИФИКАЦИЯ В ЛАБОРАТОРНА КОЛОНА

АВТОРЕФЕРАТ

На дисертация за присъждане на  
образователната и научна степен „Доктор“

Научна специалност „Технология на природните и синтетични горива“

шифър 02.10.23

*Научни ръководители:* Проф. д-р. Желчо Стефанов

Доц. д.т.н. Живко Тасев

---

инж. Живко Иванов Иванов

Кинетични изследвания на ректификация в лабораторна колона

**АВТОРЕФЕРАТ**

На дисертация за присъждане на

образователната и научна степен „Доктор“

Научна специалност „Технология на природните и синтетични горива“

шифър 02.10.23

*Научни ръководители:* Проф. д-р. Желчо Стефанов

Доц. д.т.н. Живко Тасев

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от разширен катедрен съвет на катедра „Индустиални технологии и мениджмънт” при Университет „Проф. д-р. Асен Златаров“ – Бургас

Дисертационната работа съдържа 136 страници, в които са включени 46 фигури и 15 таблици. Цитирани са 200 публикации, книги и монографии.

Изследванията по дисертационната работа са извършвани в катедра „Химично инженерство“ при Университет „Проф. д-р Асен Златаров“ – Бургас.

Дисертационният труд се състои от заглавна страница, съдържание, увод, литературен обзор – анализ на състоянието на проблема, експериментална част, научни и научно - приложни приноси и библиография.

Защитата на дисертационната работа ще се състои на ..... от .....ч. в зала ..... на Органичен корпус.

## Съдържание

Въведение	7
1. Анализ на състоянието на проблема	7
2. Цел на дисертацията	8
3. Основни задачи на дисертацията	8
4. Описания на опитната инсталация	9
5. Методика за провеждане на експеримента	10
6. Обработка на опитните данни	11
7. Методика за определяне на коефициента на масопренасяне в парна фаза	25
8. Опитни данни, тълкуване и анализ	27
9. Научни и научно-приложими приноси	37
10. Публикации и доклади свързани с дисертацията	38
11. Забелязани цитати	39

### Използвани основни означения

Символ	Описание	Мерна единица
$a$	Обемна междуфазова повърхност	$m^2/m^3$
$d_{32}$	Среден диаметър на мехурите	m
$D_G$	Коефициент на молекулярна дифузия за парната фаза	$m^2 \cdot s^{-1}$
$E_{OG}$	Локален КПД на тарелката за парна фази	%
$F = w\sqrt{\rho_G}$	Фактор на натоварване по парна фаза	$(kg/m)^{0.5} \cdot s^{-1}$
$h_{II}$	Височина на пяната	m
$K_{OGa}$	Общ обемен коефициент на масопренасяне	$kmol/m^3 \cdot s$
$K_{OG}$	Общ коефициент на масопренасяне	m/s
$K_G$	Коефициент на масопренасяне за парна фаза	m/s
$M$	Моларна маса на чистите компоненти	kg/kmol
$N_{OG}$	общ брой преносни единици за парна фази	-
$P$	Абсолютно налягане	Pa
$x^*$	Състав на течността, намираща се в равновесие с напускащите тарелката пари със състав $y_n$ .	kmol/kmol
$x_{n-1}$	Среден състав на постъпващата $n^{ma}$ тарелка течност	kmol/kmol
$x_n$	Среден състав на напускащата $n^{ma}$ тарелка течност	kmol/kmol
$y^*$	Състав на парите, намиращи се в равновесие с напускащата тарелката течност със състав $x_n$ .	kmol/kmol
$y_{n-1}$	Среден състав на постъпващия на $n^{ma}$ тарелка парни потоци	kmol/kmol
$y_n$	Среден състав на напускащия $n^{ma}$ тарелка парни потоци	kmol/kmol
$u_G$	Скорост на парите	m/s

Гръцки символи

Символ	Описание	Мерна единица
$\mu_B$	Динамичен вискозитет на течната фаза	Pa.s
$\mu_G$	Динамичен вискозитет на газова фаза	Pa.s
$\rho_G$	Плътност на парната фаза	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_L$	Плътност на течната фаза	kg/m <sup>3</sup>
$\Phi$	Свободно сечение на колоната	%
$\sigma$	Повърхностно напрежение	N/m
$\varepsilon_g$	Газо съдържане	m <sup>3</sup> .m <sup>-3</sup>

## Въведение

Ректификацията е основен метод в промишлеността за разделяне на течни хомогенни двукомпонентни и многокомпонентни смеси с цел получаване на тесни фракции или отделни компоненти с висока чистота. Ректификацията е многократно повтаряща се дестилация, при което изходната смес се подлага на редица процеси на частично изпаряване и кондензация. Процесът ректификация основно се провежда в тарелкови колони и колони с пълнеж. Основен елемент на колоните са хоризонтално разположените на определено разстояние контактни елементи (тарелки), чиято роля е да осигуряват добро директно смесване на издигащите се пари и стичащата се надолу течност.

Един от основните проблеми при тарелковите ректификационни апарати са кинетичните изследвания върху масообмена които се усложняват, поради затрудненията при определянето на междуфазовата повърхност, която се образува при диспергирането на парната фаза в течността върху тарелката, както и от смесването на течността при движението и върху тарелката и от наличието на онечиствания в разделяните смеси. В последните години се работи много усилено върху този проблем.

Настоящата работа е принос в тази област. Изследвано е влиянието на кинетичните коефициенти при ректификация на различни бинарните смеси при условия на пълно смесване на течната фаза и режим на идеално изместване по парна фаза. За доближаване до тези идеализирани модели на движение на двете фази експериментите са проведени в целево изработена малко мащабна стъклена лабораторна колона.

### 1. Анализ на състоянието на проблема

Направения в дисертацията анализ на състоянието на проблема обхваща 200 литературни източника. Разгледани са различни публикации за определяне ефективността и коефициентите на масопренасяне при процесите на абсорбция и ректификация. От направения анализ могат да се направят следните изводи:

1. Направената литературна справка показва, че за кинетичните изследвания върху барботажните апарати е натрупан значителен експериментален и практически опит. Предложени са зависимости възпроизвеждащи експерименталните резултати използвайки уравнения свързани с физическите свойства на газо-течностните системи основно при процесите на абсорбция и десорбция.

2. Предложен е математичен модел основан на пенетрационната теория за образуване и разрушаване на мехурчета за изчисляване на обемния коефициент на масопренасяне в газо-течностна система при барботажни апарати. Поради своята сложност модела не намира приложение в инженерната практика.

3. Направения анализ върху публикуваните данни за изчисляване на коефициента на масопренасяне показва, че промяната във формата на мехурите засяга не само специфичната междуфазова повърхност но и коефициента на масопренасяне.

4. Един от основните проблеми при тарелковите ректификационни апарати са кинетичните изследвания върху масообмена които се усложняват поради затрудненията при определянето на специфичната междуфазова повърхност, която се образува при диспергирането на парната фаза в течната върху тарелката. Също така кинетичните изследвания върху масообмена в тарелковите апарати се затруднява и от смесването на течността при движението и върху тарелката и от наличието на онечиствания в разделяните смеси.

5. Предложените модели обхващат малко на брой бинарни смеси изследвани основно при процесите на абсорбция и десорбция, с оскъдни данни при процеса ректификация, работещи при ниски скорости на газотечностния поток и все още не са достатъчно разширени така че да описват достатъчно добре механизма на масообмен при ситести тарелки които се използват в промишлените апарати.

## **2. Цел на дисертацията**

Цел на настоящата дисертация бе, да се изследва влиянието на физико-химичните свойства и натоварване по парна фаза върху кинетичните коефициенти при ректификация на различни бинарни смеси при условията на пълно смесване на течната фаза и режим на идеално изместване по парна фаза. За доближаване до тези идеализирани модели на движение на двете фази, експериментите са проведени в целево изработена стъклена лабораторна колона с една ситеста тарелка с диаметър 0.032 m.

## **3. Основни задачи на дисертацията**

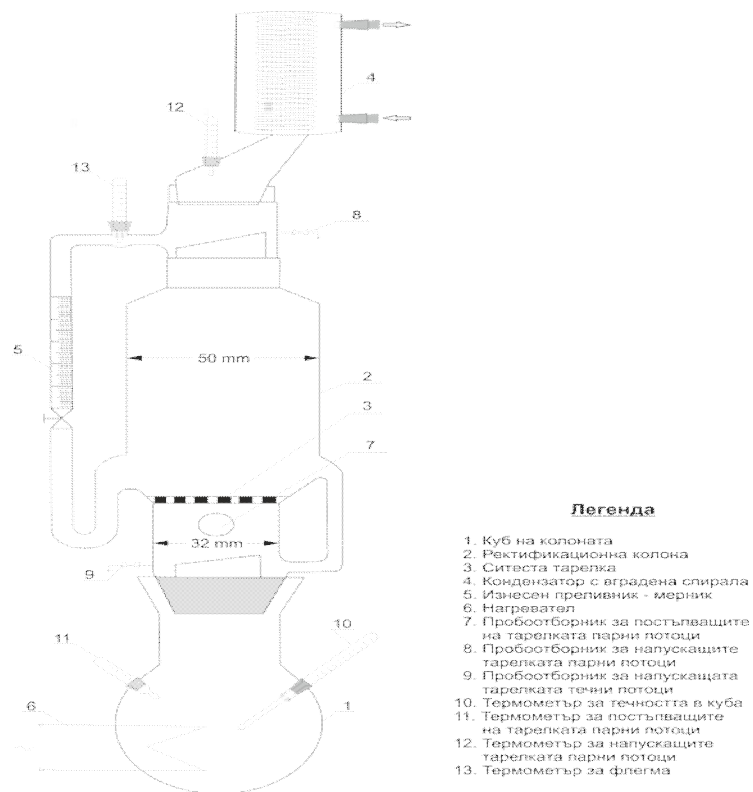
1. Експериментално определяне на локалния КПД за парна фаза;
2. Определяне на общия брой преносни единици по парна фаза;
3. Разработване на методика за определяне на коефициента на масопренасяне в парна фаза чрез обработка на експериментални данни;
4. Изследване влиянието на физико-химичните свойства и натоварване по парна фаза върху общия обменен коефициент на масопренасяне в парна фаза при ректификация на различни бинарни смеси;
5. Изследване влиянието на физико-химичните свойства и натоварване по парна фаза върху коефициента на масопренасяне в парна фаза при ректификация на различни бинарни смеси;
6. Изчисляване на специфичната обемна междуфазова повърхност при ректификация на различни бинарни смеси;
7. Обобщаване на получените резултати под формата на критериални уравнения.

## **4. Описания на опитната инсталация**

За директно измерване на локалния КПД е използвана целево изработена малко мащабна стъклена лабораторна колона – модифицирана колона на Oldershow (фиг.1.), която по-нататък ще бъде наричана тест-апаратура в предвид нейното предназначение, а именно тестване на различни смеси. Колоната, която е основна част от тест-апаратурата, има изнесени външни преливници за елеминиране на пристенния ефект върху образуващия се газотечностен двуфазен слой върху тарелката. Малкият диаметър на тарелката прави коректно приемането за пълно смесване на течността и позволява директно опитно определяне на локалната ефективност. Използвана е ситеста стъклена тарелка със следните геометрични характеристики:

- Диаметър на тарелката – 32 mm
- Брой на отворите – 44
- Диаметър на отворите – 1.1 mm
- Площ на сечението на колоната –  $15.9 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
- Свободно сечение на колоната – 5.6 %
- Височина на преливника – 12 mm

Колоната е снабдена със стъклена колба с вместимост 1l с вътрешен нагревател от 0.5 kW, свързан с електрическата мрежа чрез латер. На върха е монтиран воден стъклен кондензатор (обратен хладник). Така всички опити се провеждат при атмосферно налягане и пълна флегма.



**Фиг. 1.** Схема на опитната инсталация

## 5. Методика за провеждане на експеримента

Като първи етап на експеримента бе търсене на подходящ метод за определяне съставите на постъпващите и напускащите тарелката потоци. Като достатъчно точен, но същевременно и лесно приложим бе избран метода на рефрактометричното определяне на съставите.

В стъклена колба посредством фуния се поставя изследваната смес и се определя нейния изходен състав. Колбата е снабдена с вътрешен нагревател с мощност 0,5 kW, свързан с електрическата мрежа чрез латер. С помощта на последния се задават различни напрежения в интервал от 160 до 210 V, с което се осигурява различно топлинно натоварване на течността в колбата респ. различна скорост на парите в колоната.

Тест апаратурата е снабдена с локални живачни термометри в куба и на върха на колоната. При всяко едно от зададените напрежения след като колоната влезе в режим (постоянен дебит на флегмата и постоянни температури по височина на колоната) се вземат проби за анализ от постъпващите и напускащите тарелката парни потоци и от напускащата тарелката течност. Пробите бяха вземани от специално монтирани кранчета като тези вземани от парните потоци бяха охлаждавани с цел кондензация на парите. Своевременно се записват показанията на четирите термометъра, като от особено значение са съответно температурите на парите под и над тарелката. Височината на пяната се отчита визуално.

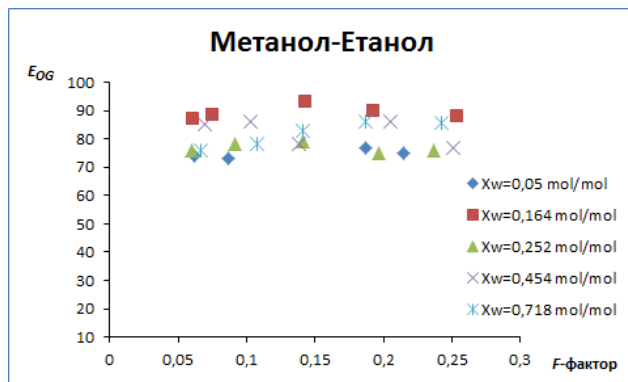
Всички анализи на състава на бинарните смеси са проведени с рефрактометър на Abbe, производство на Carl Zeiss Jena Германия – с допълнително прикачен термостат с точност при измерване на коефициента на пречупване, което отговаря на грешката при определяне на концентрацията по стандартните криви от около  $\pm 0,2\%$ . Температурата се измерваше с локални живачни термометри в куба и на върха на колоната. Визуалните наблюдения на двуфазния слой показаха образуването на хидродинамично стабилен слой. Колоната работи при натоварване по парна фаза  $F$ -фактор =  $0,06 - 0,36 (kg/m)0,5/s$ . От измерените проби бяха обработени само тези при които грешката в материалния баланс за двете фази е под  $\pm 10\%$ .

## 6. Обработка на опитните данни

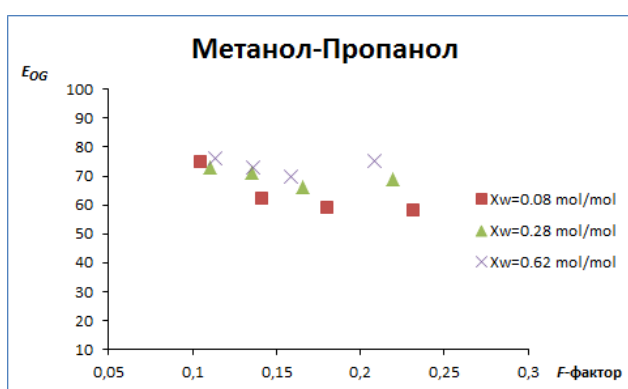
При условията на пълно смесване на течността върху тарелката, опитните данни бяха обработени като зависимост на локалния КПД  $E_{OG}$  за парна фаза от  $F$ -фактора на натоварване по парна фаза и са представени по долу за всяка смес.

От фигурата е видно, че нарастването на скоростта на парите в колоната респ.  $F$ -фактора на натоварване за парна фаза за изследваната моделна смес Метанол - Етанол (фиг. 2.) не оказва влияние върху локалния КПД за парна фаза целия изследван концентрационен интервал. Изключение прави изследваната зависимост при концентрация на лесно летливата компонента в куба на колоната  $X_w = 0,718 mol/mol$ , при която локалния КПД за парна фаза нараства с увеличаването на натоварването по парна фаза. При моделната смес Метанол - Пропанол (фиг. 3.) локалния КПД за парна фаза намалява с нарастването на скоростта на парите в колоната респ. натоварването по парна фаза. Това понижаване на локалния КПД за парна фаза е значително при концентрация на лесно летливата компонента в куба на колоната  $X_w = 0,08 mol/mol$  и се изменя в диапазона от  $75 \div 58\%$ , докато при останалите изследвани концентрационни състава локалния КПД за парна фаза се изменя в диапазона от  $76 \div 69\%$ .

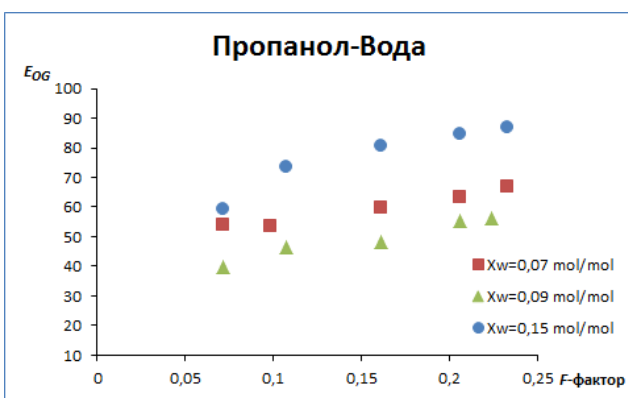
На фигура 4 и фигура 5 са представени профилите на локалния КПД за парна фаза  $E_{OG}$  в зависимост от  $F$ -фактора на натоварване по парна фаза за изследваните моделни смеси Пропанол - Вода (фиг. 4.) и Метанол - Вода (фиг. 5.). За целия изследван концентрационен интервал на моделната смес Пропанол - Вода локалната ефективност нараства с увеличаването на натоварването по парна фаза, докато при моделната смес Метанол – Вода локалната ефективност нараства само в областта на ниските стойности на концентрация на лесно летливата компонента в куба на колоната ( $X_w = 0,017 \text{ mol/mol}$ ,  $X_w = 0,022 \text{ mol/mol}$ ). При високи стойности на концентрацията на лесно летливата компонента в куба на колоната локалната ефективност не се влияе от натоварването по парна фаза, респ. скоростта на парите в колоната.



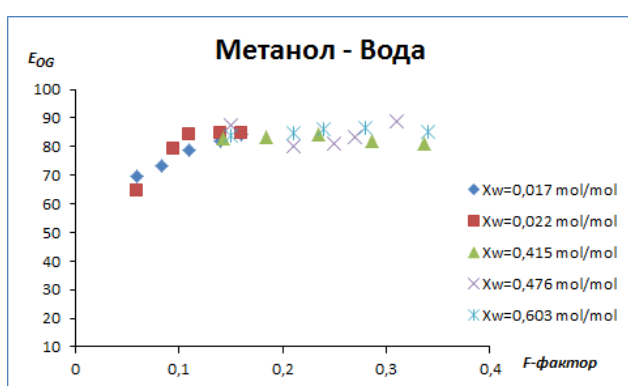
Фиг. 2. Зависимост на локалната ефективност  $E_{OG}$  за парна фаза от  $F$ -фактора на натоварване по парна фаза за моделната смес Метанол-Етанол.



Фиг. 3. Зависимост на локалната ефективност  $E_{OG}$  за парна фаза от  $F$ -фактора на натоварване по парна фаза за моделната смес Метанол-Пропанол.



Фиг. 4. Зависимост на локалната ефективност  $E_{OG}$  за парна фаза от  $F$ -фактора на натоварване по парна фаза за моделната смес Пропанол-Вода.

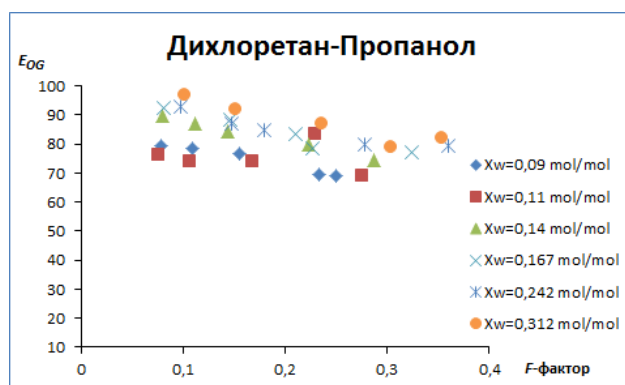


Фиг. 5. Зависимост на локалната ефективност  $E_{OG}$  за парна фаза от  $F$ -фактора на натоварване по парна фаза за моделната смес Метанол-Вода.

Влиянието на локалната ефективност от фактора на натоварване по парна фаза за моделната смес Дихлоретан - Пропанол е посочено на (фиг. 6). От фигурата е видно, че за целия изследван концентрационен диапазон локалния КПД за парна фаза намалява с нарастване скоростта на парите в колоната, респ. натоварването по парна фаза и се



изменя в интервала от 96% до 69%. При едно също натоварване по парна фаза най-високи стойности на локалния КПД за парна фаза са получени при концентрация на лесно летливата компонента в куба на колоната  $X_w = 0,312 \text{ mol/mol}$ .

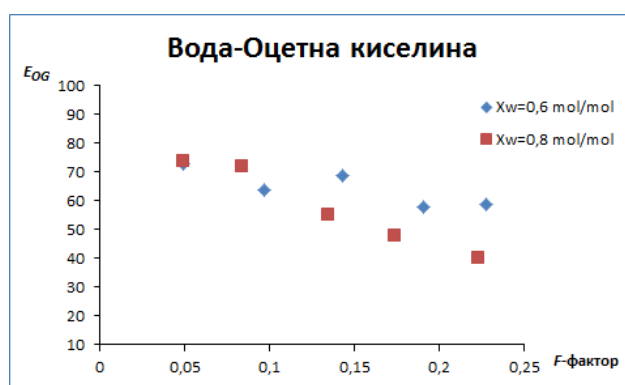


**Фиг. 6.** Зависимост на локалната ефективност  $E_{OG}$  за парна фаза от  $F$ -фактора на натоварване по парна фаза за моделната смес Дихлоретан-Пропанол.



**Фиг. 7.** Зависимост на локалната ефективност  $E_{OG}$  за парна фаза от  $F$ -фактора на натоварване по парна фаза за моделната смес Бензен-Хептан.

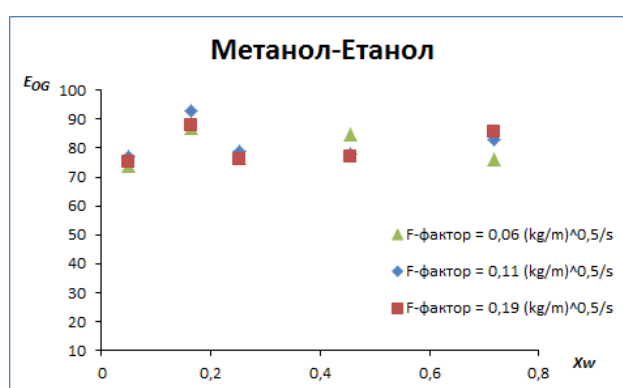
Увеличаването на натоварването по парна фаза за моделните смеси Бензен – Хептан (фиг. 7) и Вода – Оцетна киселина (фиг. 8) оказва отрицателно влияние върху локалната ефективност. За целия изследван концентрационен диапазон за моделната смес Бензен – Хептан (фиг. 7) с увеличаване на скоростта на парите в колоната, респ. натоварването по парна фаза води до намаляване на локалната ефективност, което е по-ясно изразено при концентрация на лесно летливата компонента в куба на колоната  $X_w = 0,562 \text{ mol/mol}$  и се изменя в интервала от 93% до 73%. При моделната смес Вода – Оцетна киселина (фиг. 8) локалната ефективност намалява с увеличаване на натоварването по парна фаза, като при концентрация на лесно летливата компонента в куба на колоната  $X_w = 0,8 \text{ mol/mol}$  е по-ясно изразено и намалява почти два пъти.



**Фиг. 8.** Зависимост на локалната ефективност  $E_{OG}$  за парна фаза от  $F$ -фактора на натоварване по парна фаза за моделната смес Вода-Оцетна киселина.

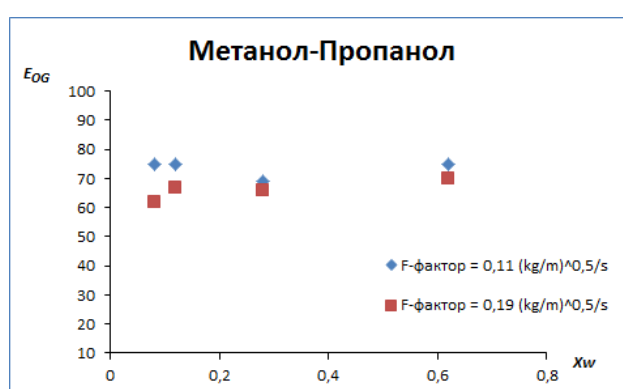
Опитно получените стойности на локалния КПД за парна фаза са представени графично в зависимост от концентрацията на лесно летливата компонента в куба на колоната за различните моделни смеси.

Влиянието на състава на лесно летливата компонента в изследваните моделни смеси Метанол-Етанол и Метанол-Пропанол върху локалната ефективност е представено на (фиг. 9) и (фиг. 10). От фигурите е видно, че за целия изследван концентрационен интервал и за двете моделни смеси, локалната ефективност не се влияе от изменението на концентрацията на лесно летливата компонента при еднакво натоварване по парна фаза. При моделната смес Метанол – Етанол (фиг. 9) се наблюдават по-високи стойности на локалната ефективност като варират от 75% до 88%, докато при моделната смес Метанол – Пропанол (фиг. 10) стойностите на локалната ефективност варират от 69% до 75%.

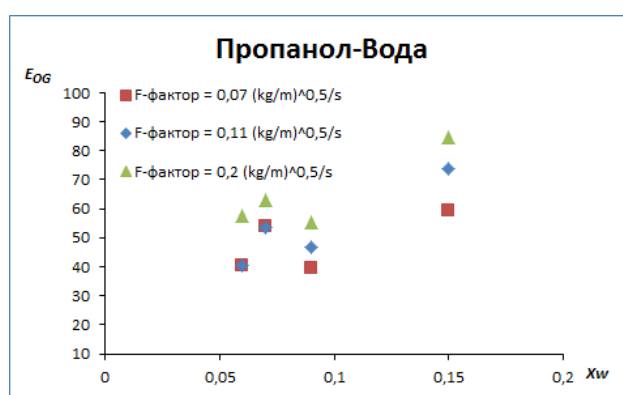


**Фиг. 9.** Зависимост на локалната ефективност  $E_{OG}$  за парна фаза от концентрацията на лесно летливата компонента  $X_w$  за моделната смес Метанол-Етанол.

При моделните смеси Пропанол - Вода и Метанол - Вода влиянието на състава на лесно летливата компонента върху локалната ефективност е представена на (фиг. 11) и (фиг. 12). Както е видно от фигурите изменението на концентрацията на лесно летливата компонента оказва съществено влияние върху локалната ефективност при моделната смес Пропанол – Вода (фиг. 11), докато при моделната смес Метанол – Вода (фиг. 12) не оказва влияние. При моделната смес Пропанол – Вода с увеличаване на съдържанието на лесно летливата компонента, нараства и локалната ефективност, като най-високи стойности се получават при по-голямо натоварване по парна фаза.

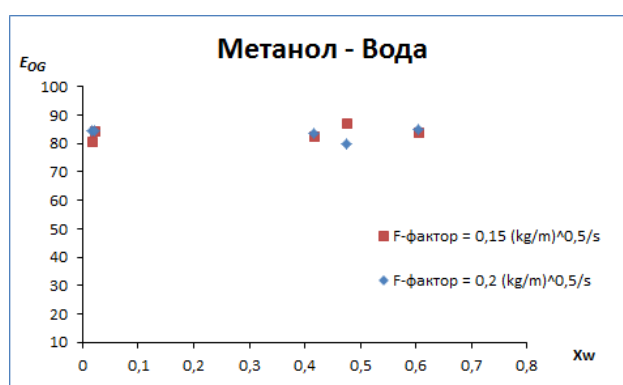


**Фиг. 10.** Зависимост на локалната ефективност  $E_{OG}$  за парна фаза от концентрацията на лесно летливата компонента  $X_w$  за моделната смес Метанол-Пропанол.

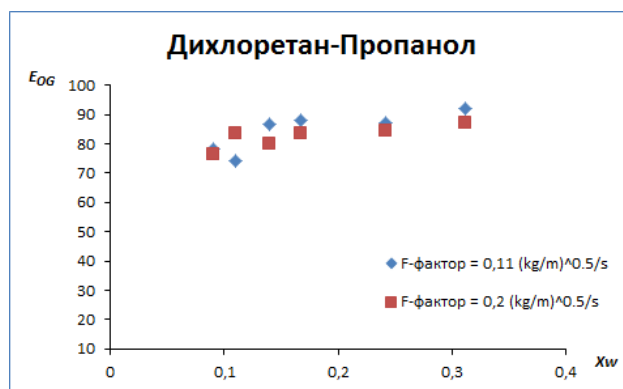


**Фиг. 11.** Зависимост на локалната ефективност  $E_{OG}$  за парна фаза от концентрацията на лесно летливата компонента  $X_w$  за моделната смес Пропанол.

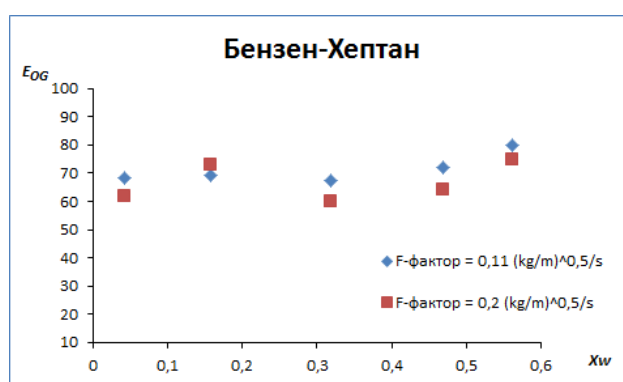
При моделната смес Дихлоретан - Пропанол влиянието на състава на лесно летливата компонента е представено на (фиг. 13). Както е видно от фигурата с увеличаване на съдържанието на леснолетливата компонента в куба на колоната нараства и локалната ефективност за парна фаза като стойностите се изменят в интервала от 74% до 92%.



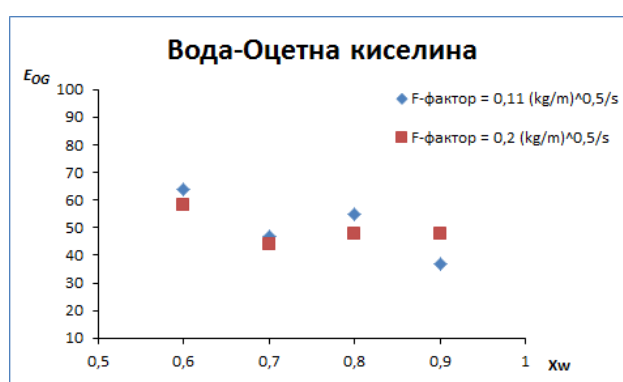
**Фиг. 12.** Зависимост на локалната ефективност  $E_{OG}$  за парна фаза от концентрацията на лесно летливата компонента  $X_w$  за моделната смес Метанол - Вода.



Фиг. 13. Зависимост на локалната ефективност  $E_{OG}$  за парна фаза от концентрацията на лесно летливата компонента  $X_w$  за моделната смес Дихлоретан-Пропанол.



Фиг. 14. Зависимост на локалната ефективност  $E_{OG}$  за парна фаза от концентрацията на лесно летливата компонента  $X_w$  за моделната смес Бензен-Хептан.

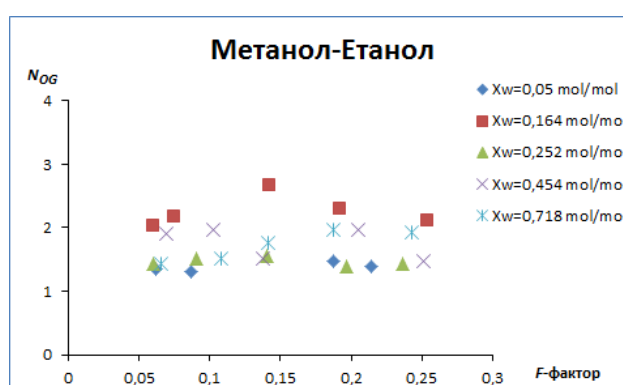


Фиг. 15. Зависимост на локалната ефективност  $E_{OG}$  за парна фаза от концентрацията на лесно летливата компонента  $X_w$  за моделната смес Вода-Оцетна киселина.

Влиянието на концентрацията на лесно летливата компонента върху локалната ефективност за парна фаза за моделната смес Бензен – Хептан е представена на (фиг. 14). Ефективността на разделяне не се изменя съществено като слабо се увеличава с нарастването на съдържанието на лесно летливата компонента в куба на колоната. Стойностите на локалната ефективност за парна фаза за целия изследван концентрационен интервал са в диапазона от 63% до 81%.

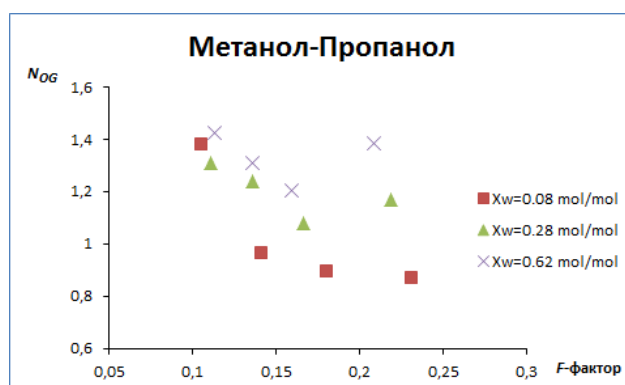
Увеличаването на концентрацията на лесно летливата компонента в куба на колоната оказва негативно влияние върху ефективността на разделяне при моделната смес Вода – Оцетна киселина (фиг. 15). При постоянно натоварване по парна фаза за целия изследван концентрационен диапазон локалната ефективност значително намалява с нарастване на съдържанието на лесно летливата компонента.

От опитно получените стойности за локалната ефективност за парна фаза  $E_{OG}$  бе изчислен общият брой преносни единици  $N_{OG}$  съгласно уравнение (10). На следващите графики е показана зависимостта на общия брой преносни единици като функция от  $F$ -фактора респ. скоростта на парите в колоната за различните моделни смеси.

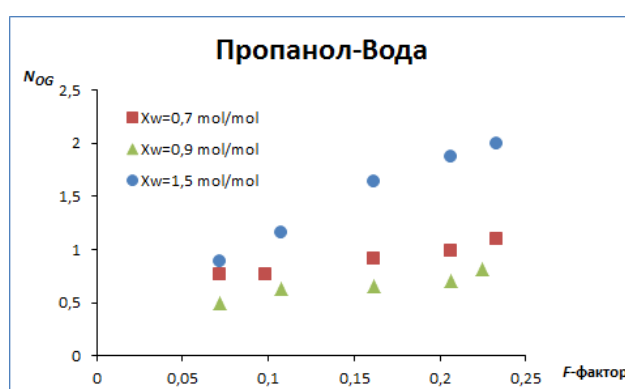


**Фиг. 16.** Зависимост на общият брой преносни единици  $N_{OG}$  за парна фаза от  $F$ -фактора на натоварване по парна фаза за моделната смес Метанол-Етанол.

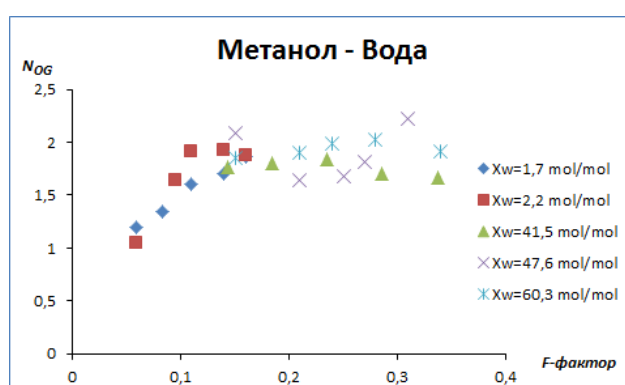
На фигура 16 е показана зависимостта на общия брой преносни единици като функция от  $F$ -фактора на натоварване по парна фаза за сместа Метанол - Етанол. От фигурата е видно че, за целия изследван концентрационен интервал общият брой преносни единици не се влияе от нарастването на скоростта на парите в колоната. При сместа Метанол - Пропанол (фиг. 17) с нарастване на натоварване по парна фаза, общият брой преносни единици намалява и при трите изследвани концентрационни състава. При концентрация на лесно летливата компонента в куба на колоната  $X_w = 0,08 \text{ mol/mol}$  намаляването на общия брой преносни единици е почти два пъти. Нарастване на общият брой преносни единици с нарастване на натоварването за парна фаза се наблюдава при сместа Пропанол - Вода (фиг. 18) и за трите изследвани състава, което нарастване е над два пъти при концентрация на лесно летливата компонента  $X_w = 1,5 \text{ mol/mol}$ . За целия изследван концентрационен интервал броя преносни единици се изменя в интервала от 0,5 до 2.



**Фиг. 17.** Зависимост на общият брой преносни единици  $N_{OG}$  за парна фаза от  $F$ -фактора на натоварване по парна фаза за моделната смес Метанол-Пропанол.



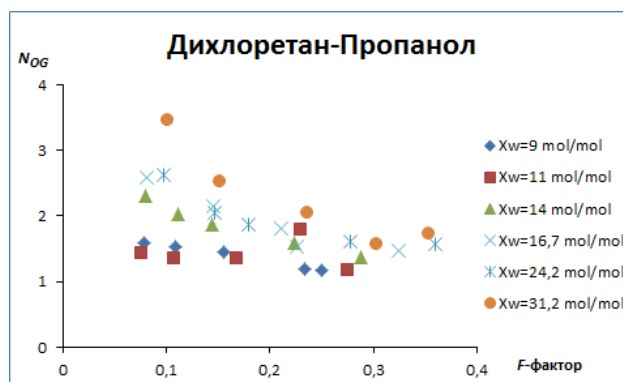
**Фиг. 18.** Зависимост на общият брой преносни единици  $N_{OG}$  за парна фаза от  $F$ -фактора на натоварване по парна фаза за моделната смес Пропанол-Вода.



**Фиг. 19.** Зависимост на общият брой преносни единици  $N_{OG}$  за парна фаза от  $F$ -фактора на натоварване по парна фаза за моделната смес Метанол-Вода.

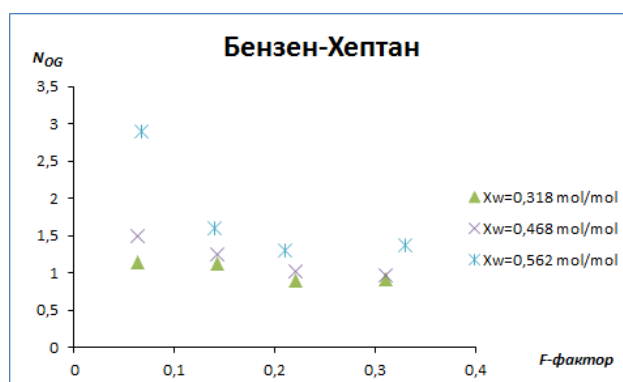
На фигура 19 и фигура 20 е представена зависимостта на общият брой преносни единици като функция от  $F$ -фактора на натоварването за парна фаза респ. от скоростта на парите в колоната за смесите Метанол - Вода и Дихлоретан - Пропанол. При сместа Метанол - Вода (фиг. 19)  $F$ -фактора на натоварването за парна фаза не оказва съществено влияние върху общият брой преносни единици в областта където са получени високи стойности на изследваната концентрация на лесно летливата компонента в куба на колоната ( $X_w = 0,415 \text{ mol/mol}$ ,  $X_w = 0,476 \text{ mol/mol}$ ,  $X_w = 0,603 \text{ mol/mol}$ ). В областта където са получени ниски стойности на изследваната концентрация на лесно летливата компонента в куба на колоната ( $X_w = 0,017 \text{ mol/mol}$ ,  $X_w = 0,022 \text{ mol/mol}$ ), общия брой преносни единици съществено се изменя като нараства в диапазона от 1 до 1,9 с нарастване на натоварването по парна фаза,

респ. скоростта на парите в колоната. При сместа Дихлоретан - Пропанол (фиг. 20) увеличаването на натоварването по парна фаза води до намаляване на общият брой преносни единици. Като това намаляване е почти два пъти при концентрационен състав на моделната смес  $X_w = 0,312 \text{ mol/mol}$ .

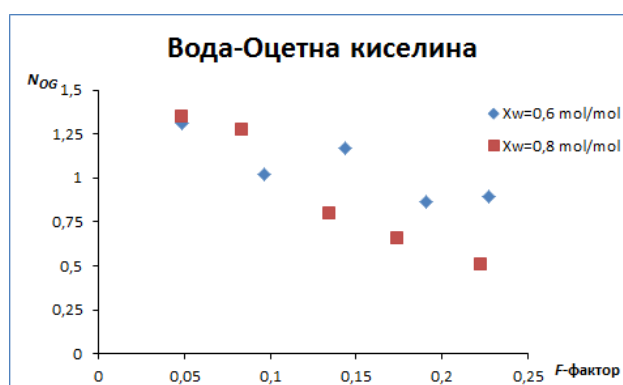


**Фиг. 20.** Зависимост на общият брой преносни единици  $N_{OG}$  за парна фаза от  $F$ -фактора на натоварване по парна фаза за моделната смес Дихлоретан-Пропанол.

С увеличаване на скоростта на парите в колоната, респ. натоварването за парна фаза при моделните смеси Бензен – Хептан (фиг. 21) и Вода – Оцетна киселина (фиг. 22) се наблюдава намаляване на стойностите на общия брой преносни единици. Общия брой преносни единици за целия изследван концентрационен диапазон се изменя при моделната смес Бензен – Хептан в интервала от 2,9 до 0,9, докато при моделната смес Вода – Оцетна киселина в интервала от 1,34 до 0,5. Най-голямо понижение на стойностите на общия брой преносни единици почти 2,5 пъти се наблюдава както при моделната смес Бензен - Хептан така и при моделната смес Вода – Оцетна киселина съответно при концентрация на лесно летливата компонента в куба на колоната  $X_w = 0,562 \text{ mol/mol}$  (фиг. 21) и  $X_w = 0,8 \text{ mol/mol}$  (фиг. 22).



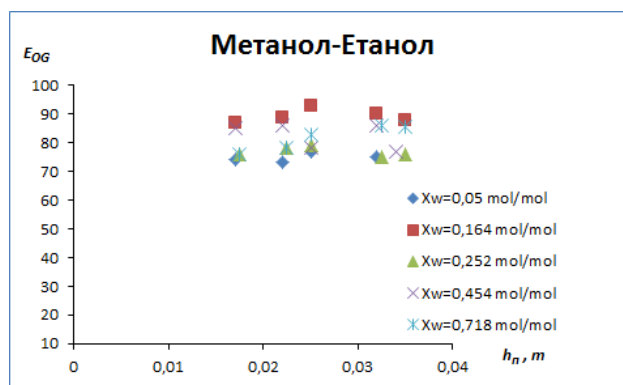
**Фиг. 21.** Зависимост на общият брой преносни единици  $N_{OG}$  за парна фаза от  $F$ -фактора на натоварване по парна фаза за моделната смес Бензен-Хептан.



**Фиг. 22.** Зависимост на общият брой преносни единици  $N_{OG}$  за парна фаза от  $F$ -фактора на натоварване по парна фаза за моделната смес Вода-Оцетна киселина

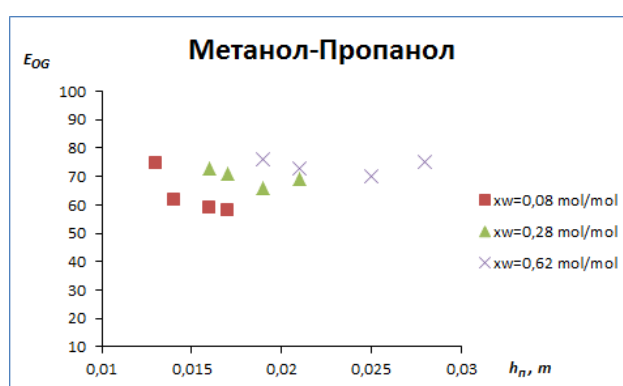
В резултат на визуалните наблюдения върху височината на пяната е изработена графичната зависимост на локания КПД за парна фаза като функция от височината на пяната и е представена по долу за всяка моделна смес по отделно.

На фигура 23 е изобразена графичната зависимост на локания КПД за парна фаза като функция от височината на пяната за моделната смес Метанол – Етанол. Височината на пяната се изменя в интервала от 0,017 m до 0,035 m като не оказва съществено влияние върху локалната ефективност.

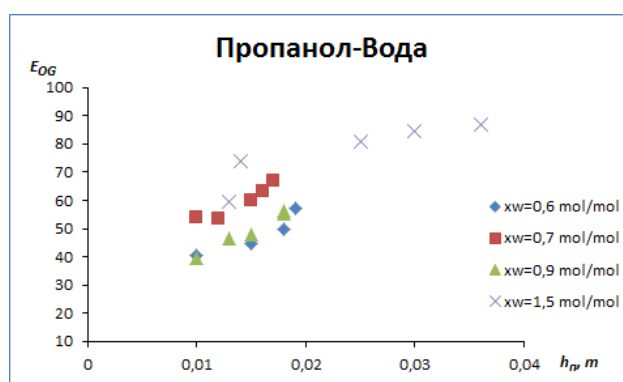


**Фиг. 23.** Зависимост на локалната ефективност  $E_{OG}$  за парна фаза от височината на пяната ( $h_{П}$ ) за моделната смес Метанол-Етанол.

Локалната ефективност за парна фаза за моделната смес Метанол – Пропанол като функция от височината на пяната при три различни концентрационни състава на лесно летливата компонента в куба на колоната е представена на фигура 24. При концентрация на лесно летливата компонента в куба на колоната  $X_w = 0,08 \text{ mol/mol}$  с нарастване на височината на пяната от  $0,013 \text{ m}$  до  $0,017 \text{ m}$ , локалната ефективност понижава своите стойности от  $75\%$  до  $58\%$ . При останалите два концентрационни състава ( $X_w = 0,28 \text{ mol/mol}$ ,  $X_w = 0,62 \text{ mol/mol}$ ) с нарастването на височината на пяната от  $0,016 \text{ m}$  до  $0,028 \text{ m}$ , локалната ефективност се изменя в много малки граници от  $76\%$  до  $66\%$ .

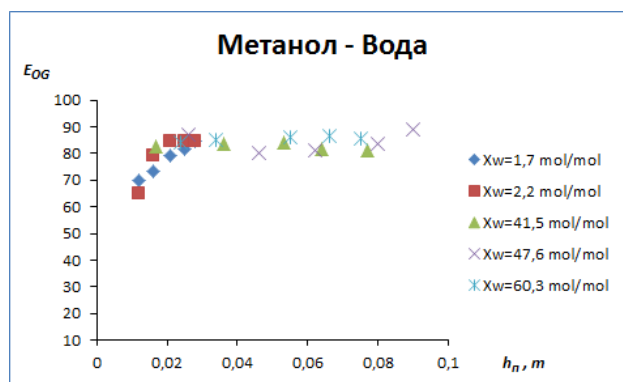


**Фиг. 24.** Зависимост на локалната ефективност  $E_{OG}$  за парна фаза от височината на пяната ( $h_{П}$ ) за моделната смес Метанол-Пропанол.



**Фиг. 25.** Зависимост на локалната ефективност  $E_{OG}$  за парна фаза от височината на пяната ( $h_{П}$ ) за моделната смес Пропанол-Вода.

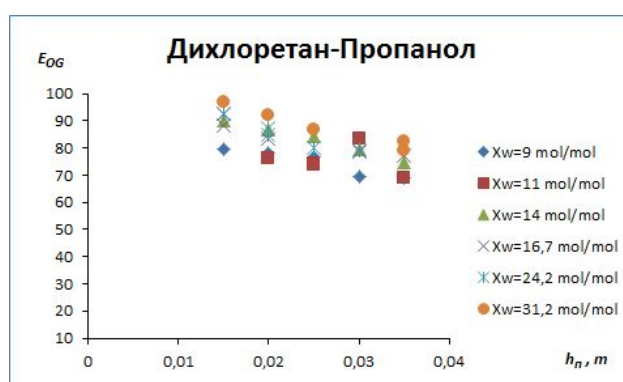
Зависимост на локалната ефективност за парна фаза от височината на пяната при различни концентрации на лесно летливата компонента в куба на колоната за моделната смес Пропанол - Вода е представена на фигура 25. С нарастване на височината на пяната за целия концентрационен интервал, локалната ефективност нараства, като при концентрация на лесно летливата компонента в куба на колоната  $X_w = 0,15 \text{ mol/mol}$  значително нараства и има най-големи стойности.



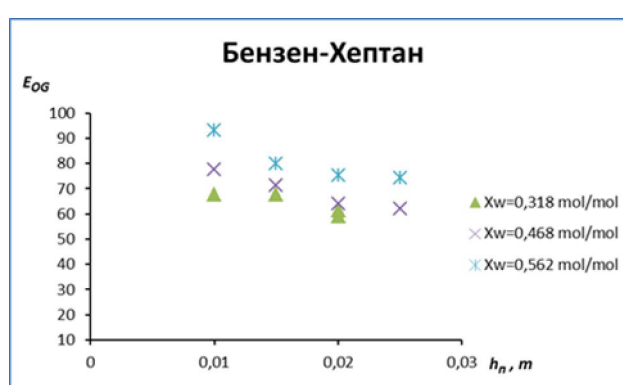
**Фиг. 26.** Зависимост на локалната ефективност  $E_{OG}$  за парна фаза от височината на пяната ( $h_{II}$ ) за моделната смес Метанол-Вода.

За моделната смес Метанол – Вода графичната зависимост на локалния КПД за парна фаза като функция от височината пяната за различни концентрационни състави е показана на фигура 26. От фигурата е видно, че за концентрационните състави  $X_w = 0,017 \text{ mol/mol}$  и  $X_w = 0,022 \text{ mol/mol}$  ефективността на разделяне се увеличава от 65% до 85% с нарастване на височината на пяната. При концентрационните състави  $X_w = 0,415 \text{ mol/mol}$ ,  $X_w = 0,476 \text{ mol/mol}$  и  $X_w = 0,603 \text{ mol/mol}$  локалната ефективност за парна фаза не се влияе от значителното нарастване на височината на пяната. Това нарастване на височината на пяната е почти три пъти по-голямо отколкото при концентрация на лесно летливата компонента в куба на колоната  $X_w = 0,017 \text{ mol/mol}$  и  $X_w = 0,022 \text{ mol/mol}$ .

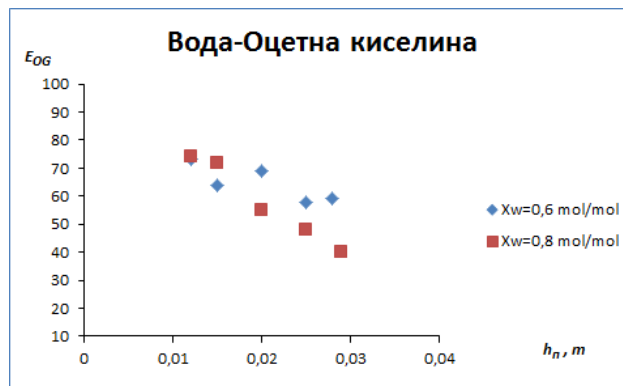
Намаляване на ефективността на разделяне с нарастване на височината на пяната за целия изследван концентрационен диапазон се наблюдава при моделните смеси Дихлоретан – Пропанол (фиг. 27), Бензен – Хептан (фиг. 28) и Вода – Оцетна киселина (фиг. 29). При моделната смес Дихлоретан – Пропанол (фиг. 27) височината на пяната нараства от  $0,015 \text{ m}$  до  $0,035 \text{ m}$  което води до понижаване на локалната ефективност с 20%. Подобно понижение на локалната ефективност се наблюдава и при моделната смес Бензен – Хептан (фиг. 28) при което височината на пяната се изменя в по-тесен диапазон от  $0,015 \text{ m}$  до  $0,025 \text{ m}$ , като за концентрация на лесно летливата компонента в куба на колоната  $X_w = 0,318 \text{ mol/mol}$  локалната ефективност достига най-ниски стойности.



**Фиг. 27.** Зависимост на локалната ефективност  $E_{OG}$  за парна фаза от височината на пяната ( $h_{II}$ ) за моделната смес Дихлоретан-Пропанол.



**Фиг. 28.** Зависимост на локалната ефективност  $E_{OG}$  за парна фаза от височината на пяната ( $h_{II}$ ) за моделната смес Бензен-Хептан.



**Фиг. 29.** Зависимост на локалната ефективност  $E_{OG}$  за парна фаза от височината на пяната ( $h_{П}$ ) за моделната смес Вода-Оцетна киселина.

Нарастването на височината на пяната оказва отрицателно влияние върху ефективността на разделяне и при моделната смес Вода – Оцетна киселина (фиг. 29). За целия изследван концентрационен диапазон локалната ефективност за парна фаза се понижава с нарастване на височината на пяната. При съдържание на леснолетливата компонента в куба на колоната  $X_w = 0,8 \text{ mol/mol}$  локалната ефективност по парна фаза намалява от 74% до 40%, а при съдържание на лесно летливата компонента в куба на колоната  $X_w = 0,6 \text{ mol/mol}$ , локалната ефективност се понижава от 74% до 60% при едно и също изменение на стойностите на височината на пяната от 0,012 до 0,029 m.

### 7. Методика за определяне на коефициента на масопренасяне в парна фаза

Моларната маса на използваните смеси се изчислява по уравнение:

$$M_{CM} = y_{cp}M_A + (1 - y_{cp})M_B \quad (1)$$

Плътностите на парната (2) и течната (3) фази се определят от следните зависимости:

$$\rho_G = \frac{M_{CM}T_0}{22.4T} \quad (2)$$

$$\rho_L = \frac{1}{\frac{x_A}{\rho_A} + \frac{(1-x_A)}{\rho_B}} \quad (3)$$

Необходимо е да се изчислят и динамичните вискозитета на парната (4) и течна (5) фази:

$$\mu_G = \frac{M_{CM}}{\frac{y_{cp}M_A}{\mu_A} + \frac{(1-y_{cp})M_B}{\mu_B}} \quad (4)$$

$$\mu_L = \frac{1}{\frac{x_A}{\mu_A} + \frac{(1-x_A)}{\mu_B}} \quad (5)$$

Коефициента на молекулярна дифузия за газовата фаза  $D_G$  на бинарните смеси е изчисляван по модела на Fuller-Shettler-Giddings:

$$D_G = \frac{4,3 \cdot 10^{-7} T^{3,2}}{p(v_A^{1/3} + v_B^{1/3})^2} \sqrt{\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B}} \quad (6)$$

Повърхностното напрежение оказва сложно влияние върху кинетиката на масопреносния процес. От една страна повърхностното напрежение сравнително слабо влияе върху ефективността на разделителния процес, но от друга страна то оказва съществено влияние върху структурата на газо-течностния слой, главно върху размера на мехурите. Изчислява се от следната зависимост:

$$\sigma^{0,25} = \rho_L \left( \frac{x}{\rho_A} \sigma_A^{0,25} + \frac{(1-x)}{\rho_B} \sigma_B^{0,25} \right) \quad (7)$$



Определящо значение за масообмена има средният диаметър на мехурите, поради което той е използван като определящ геометричен размер. Съгласно изведеното от Wilkinson уравнение размерът на мехурите е пропорционален на плътността на газа на степен -0.11, установено е че десетократно увеличение на плътността на газа намалява размера на балона с почти 30%.

$$d_{32} = 3g^{-0.44} \sigma^{0.34} \mu_L^{0.22} \rho_L^{-0.45} \rho_G^{-0.11} u_G^{-0.02} \quad (8)$$

Връзката между броя преносни единици и обемният коефициент на масопренасяне може да се определи от следното уравнение:

$$K_{OG} \cdot a = \frac{u_G \rho_G [-\ln(1 - E_{OG})]}{d_{32} M_{CM}} \quad (9)$$

$$\text{където: } -\ln(1 - E_{OG}) = N_{OG} \quad (10)$$

Ефективността на преноса на маса в газ-течност системи най-често се изразява с помощта на обемния коефициент на масопренасяне ( $K_{OG} \cdot a$ ). Твърде много явления влияят върху стойностите на коефициента на масопренасяне ( $K_{OG}$ ) и на специфичната обемна междуфазова повърхност ( $a$ ) поради тази причина общият им ефект не може лесно да бъде дефиниран. Разделянето на обемния коефициент на масопренасяне на междуфазовата повърхност е първата стъпка за по-добро разбиране на основните процеси на масопренасяне. За реализиране на тази стъпка е необходимо да се определи специфичната обемна междуфазова повърхност за колона със ситеста тарелка по следната зависимост:

$$a = \frac{6 \varepsilon_G}{d_{32}} \quad (11)$$

Където  $\varepsilon_G$  е газосъдържанието и се изчислява от уравнението:

$$\varepsilon_G = \frac{u_G^{0.28} \rho_G^{0.14}}{\phi^{0.14} \sigma^{0.07} \rho_L^{0.07}} \quad (12)$$

Коефициента на масопренасяне  $K_{OG}$  се определя от следната зависимост:

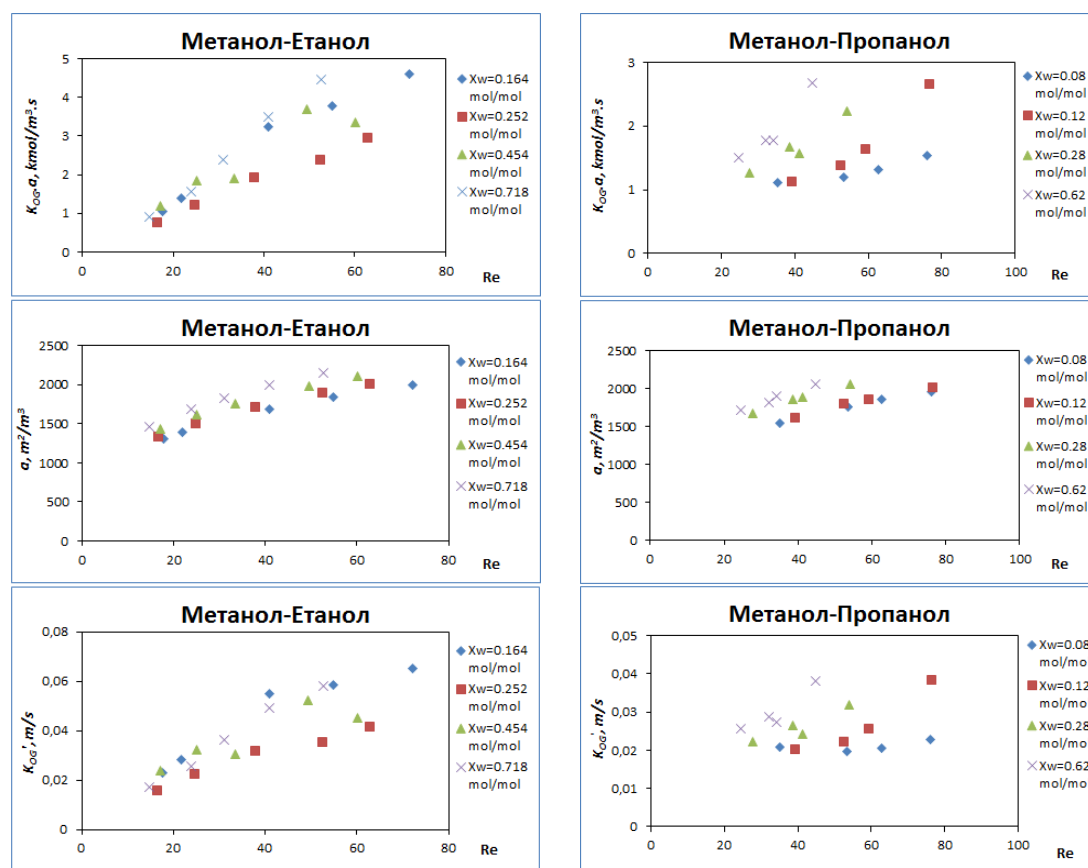
$$K_{OG} = \frac{K_{OG} \cdot a}{a} \quad (13)$$

## 8. Опитни данни, тълкуване и анализ

На фигура 30 са представени опитните данни за изменението на общия обемен коефициент на масопренасяне за парна фаза ( $K_{OG} \cdot a$ ), специфичната обемна междуфазова повърхност ( $a$ ) и коефициента на масопренасяне ( $K_{OG}$ ) в зависимост от критерия на Рейнолдс за парна фаза ( $Re_G$ ) за моделните смеси Метанол – Етанол и Метанол-Пропанол.

Както е видно от фигура 30 за моделната смес Метанол – Етанол за изследваните концентрационни интервали общия обемен коефициент на масопренасяне нараства с увеличаване на натоварването за парна фаза. Общият обемен коефициент на масопренасяне нараства 6 пъти за целия изследван концентрационен интервал като се изменя в интервала от  $0,75 \div 4,59 \text{ kmol/m}^3 \cdot \text{s}$ . При едно и също натоварване за парна фаза най-големи стойности на общия обемен коефициент на масопренасяне се получават при концентрация на лесно летливата компонента в куба на колоната  $X_w = 0,718 \text{ mol/mol}$ . С нарастване на стойностите на критерия на Рейнолдс за парна фаза за целия изследван концентрационен интервал от  $X_w = 0,164 \div 0,718 \text{ mol/mol}$ , специфичната междуфазова повърхност се изменя в интервала  $1300 \div 2153 \text{ m}^2/\text{m}^3$ , т.е. нараства 1,6 пъти. За изследвания скоростен профил коефициента на масопренасяне се изменя като нараства в границите  $0,016 \div 0,065 \text{ kmol/m}^3 \cdot \text{s}$  с нарастване скоростта на парите в колоната респ. критерия на Рейнолдс. При изследваната моделна смес Метанол - Пропанол за изследваните концентрационни интервали общия обемен коефициент на масопренасяне нараства с увеличаване на натоварването за парна фаза над два пъти и се изменя в интервала от  $1,12 \div 2,68 \text{ kmol/m}^3 \cdot \text{s}$ . Изключение прави концентрационния интервал  $X_w = 0,08 \text{ mol/mol}$  при който общият обемен коефициент на масопренасяне се изменя в много малки граници в интервала от  $1,11 \div 1,54 \text{ kmol/m}^3 \cdot \text{s}$ . С нарастване на концентрацията на лесно летливата компонента в куба на колоната, общият обемен коефициент на масопренасяне за парна фаза нараства и приема най-високи стойности при концентрацията с

най-голямо съдържание на лесно летлива компонента  $X_w=0,62 \text{ mol/mol}$ . С нарастване на стойностите на критерия на Рейнолдс за парна фаза, специфичната обемна междуфазова повърхност нараства като се изменя в интервала  $1546 \div 2061 \text{ m}^2/\text{m}^3$ . За концентрационния интервал  $X_w=0,08 \text{ mol/mol}$  с нарастване на натоварването за парна фаза, специфичната обемна междуфазова повърхност се изменя в интервала  $1500 \div 1800 \text{ m}^2/\text{m}^3$  което води до нарастване на общия обемен коефициент на масопренасяне, докато коефициента на масопренасяне се запазва сравнително постоянен в границите на  $0,02 \div 0,022 \text{ m/s}$ . Коефициента на масопренасяне с нарастване скоростта на парите в колоната за концентрация на лесно летливата компонента в куба на колоната  $X_w=0,08 \text{ mol/mol}$  се запазва почти постоянен за целия скоростен интервал и не зависи от натоварването по парна фаза. За останалите изследвани концентрационни състава коефициента на масопренасяне нараства с увеличаване на скоростта на парите в колоната, което нарастване е най-ясно изразено при концентрация на лесно летливата компонента в куба на колоната  $X_w=0,62 \text{ mol/mol}$  от  $0,025$  до  $0,04 \text{ m/s}$ .

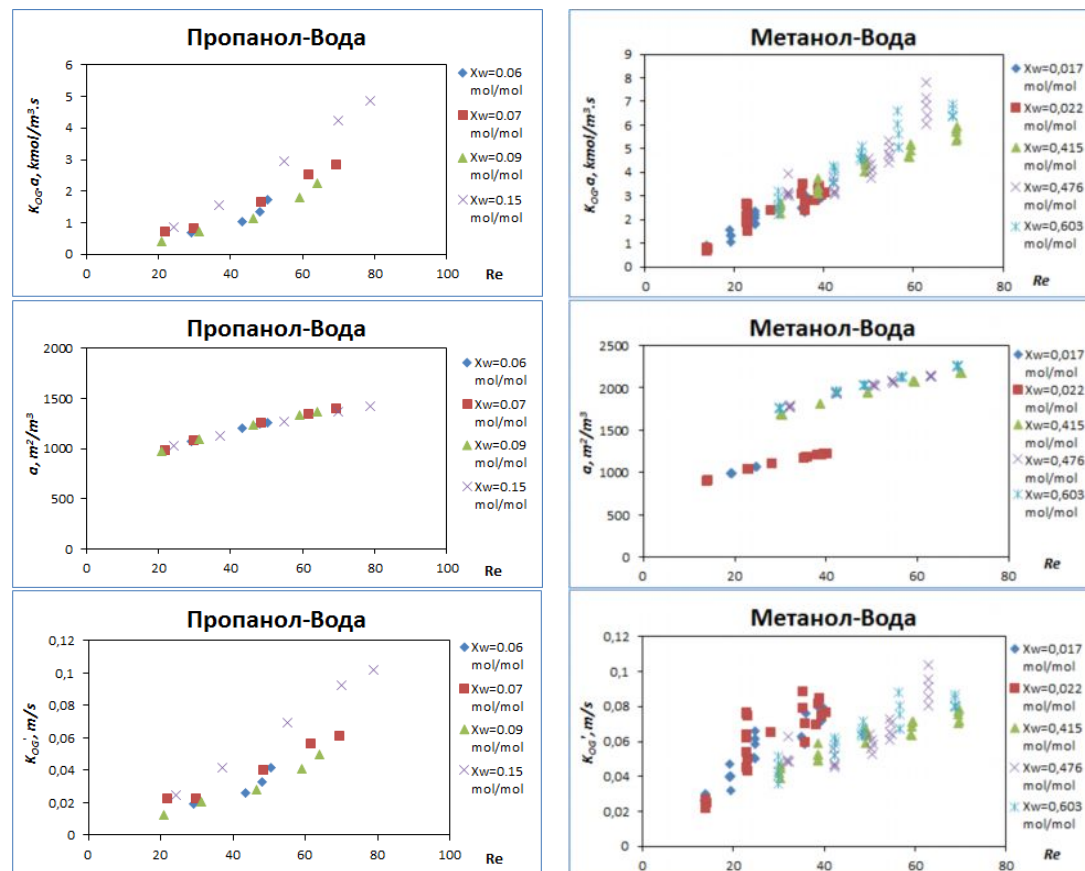


**Фиг. 30.** Зависимост на общия обемен коефициент на масопренасяне по парна фаза ( $K_{OG} \cdot a$ ), специфичната обемна междуфазова повърхност ( $a$ ) и коефициента на масопренасяне ( $K_{OG}'$ ) в зависимост от критерия на Рейнолдс респ. скоростта на парите в колоната за моделните смеси Метанол-Етанол и Метанол-Пропанол.

На следващата фигура 31 са представени графичните зависимости на изменението на общия обемен коефициент на масопренасяне за парна фаза ( $K_{OG} \cdot a$ ), специфичната обемна междуфазова повърхност ( $a$ ) и коефициента на масопренасяне за парна фаза ( $K_{OG}'$ ) в зависимост от критерия на Рейнолдс за парна фаза ( $Re_G$ ) за моделните смеси Пропанол – Вода и Метанол-Вода.

Както е видно от фигурата с нарастване на стойностите на критерия на Рейнолдс от  $20$  до  $80$ , за моделната смес Пропанол – Вода общият обемен коефициент на масопренасяне за парна фаза, специфичната обемна междуфазова повърхност и коефициента на масопренасяне за парна фаза нарастват за целия изследван концентрационен диапазон. При най-високата изследвана концентрация на лесно летливата компонента в куба на колоната  $X_w=0,15 \text{ mol/mol}$  общият обемен коефициент на масопренасяне за парна фаза и коефициента на масопренасяне за парна фаза с нарастване на натоварването за парна фаза имат два пъти по-високи стойности отколкото при останалите изследвани концентрационни състава при еднакво натоварване за парна фаза. Специфичната обемна междуфазова повърхност се изменя в диапазона от  $800$  до  $1400 \text{ m}^2/\text{m}^3$ . Както се и очакваше и при тази моделна смес на базата на алкохол и вода (Метанол-Вода), обемния коефициент на масопренасяне за парна фаза нараства и се изменя в същия диапазон от  $1$  до  $6 \text{ kmol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$  с увеличаване на натоварването за парна фаза. Съпоставимост на данните има и при стойностите на специфичната обемна междуфазова повърхност. В областта на ниските стойности на концентрация на лесно летливата компонента в куба на колоната, специфичната обемна междуфазова повърхност се изменя като нараства в диапазона от  $800$  до  $1400 \text{ m}^2/\text{m}^3$  с увеличаването на натоварването за парна фаза. Коефициента на масопренасяне за парна фаза нараства с увеличаването на скоростта на парите в колоната респ. критерия на Рейнолдс за целия изследван концентрационен интервал.

На фигура 32 е показана за моделните смеси Дихлоретан - Пропанол и Бензен – Хептан зависимостта на изменението на общия обемен коефициент на масопренасяне по парна фаза ( $K_{OG} \cdot a$ ), специфичната обемна междуфазова повърхност ( $a$ ) и коефициента на масопренасяне ( $K_{OG}'$ ) като функция от критерия на Рейнолдс за парна фаза ( $Re_G$ ).

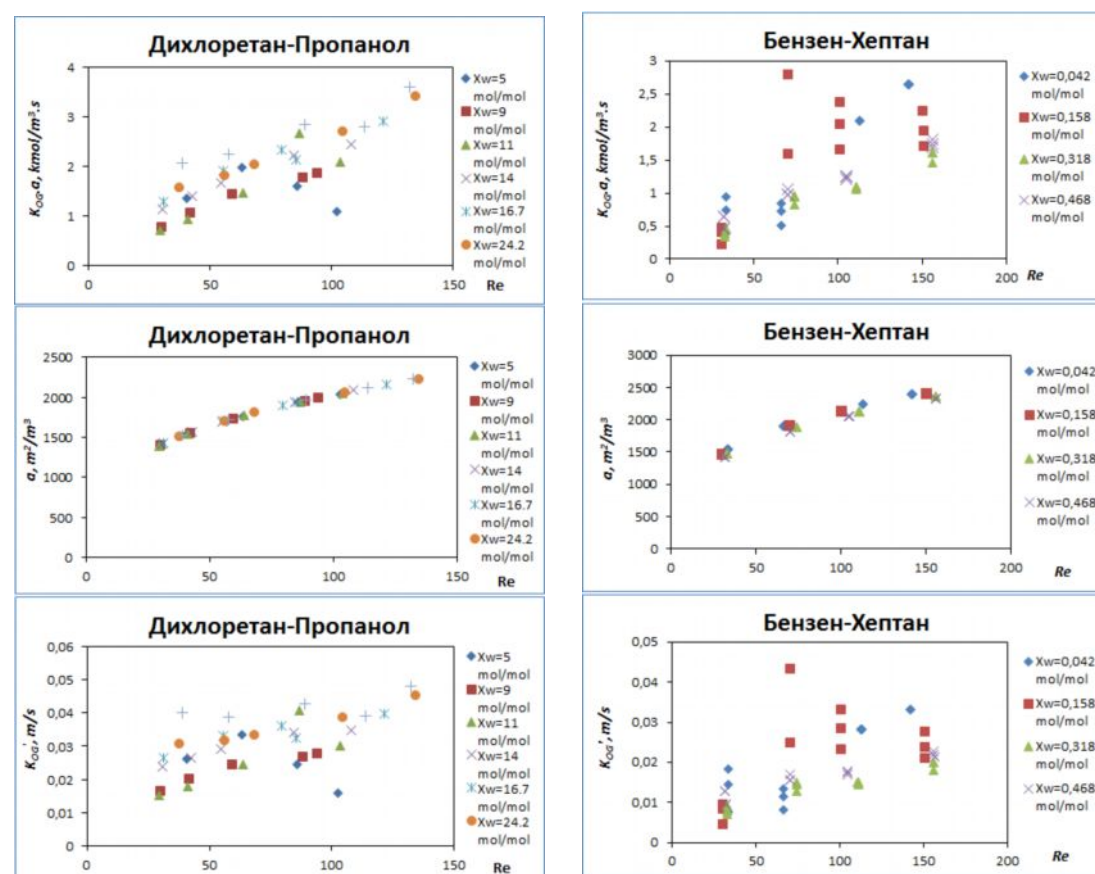


**Фиг. 31.** Зависимост на общия обменен коефициент на масопренасяне за парна фаза ( $K_{OG} \cdot a$ ), специфичната обемна междуфазова повърхност ( $a$ ) и коефициента на масопренасяне ( $K_{OG}'$ ) в зависимост от критерия на Рейнолдс респ. скоростта на парите в колоната за моделните смеси Пропанол-Вода и Метанол-Вода.

За целия изследван концентрационен диапазон общият за моделната смес Дихлоретан - Пропанол обменен коефициент на масопренасяне за парна фаза нараства с увеличаване на скоростта на парите в колоната респ. критерия на Рейнолдс като се изменя в интервала  $0,71 \div 3,61 \text{ kmol/m}^3 \cdot \text{s}$ . Както е видно от фигурата с нарастване на концентрацията на лесно летливата компонента и скоростта на парите в колоната, расте и стойността на общия обменен коефициент на масопренасяне, като за концентрационните интервали  $X_w = 0,242 \text{ mol/mol}$  и  $X_w = 0,312 \text{ mol/mol}$  има най-високи стойности. Специфичната обемна междуфазова повърхност нараства с увеличаването на стойностите на критерия на Рейнолдс и не зависи от изменението на концентрацията на лесно летливата компонента като се изменя в интервала  $1400 \div 2200 \text{ m}^2/\text{m}^3$ . Увеличаването на скоростта на парите в колоната респ. критерия на Рейнолдс, коефициента на масопренасяне нараства за целия изследван концентрационен диапазон.

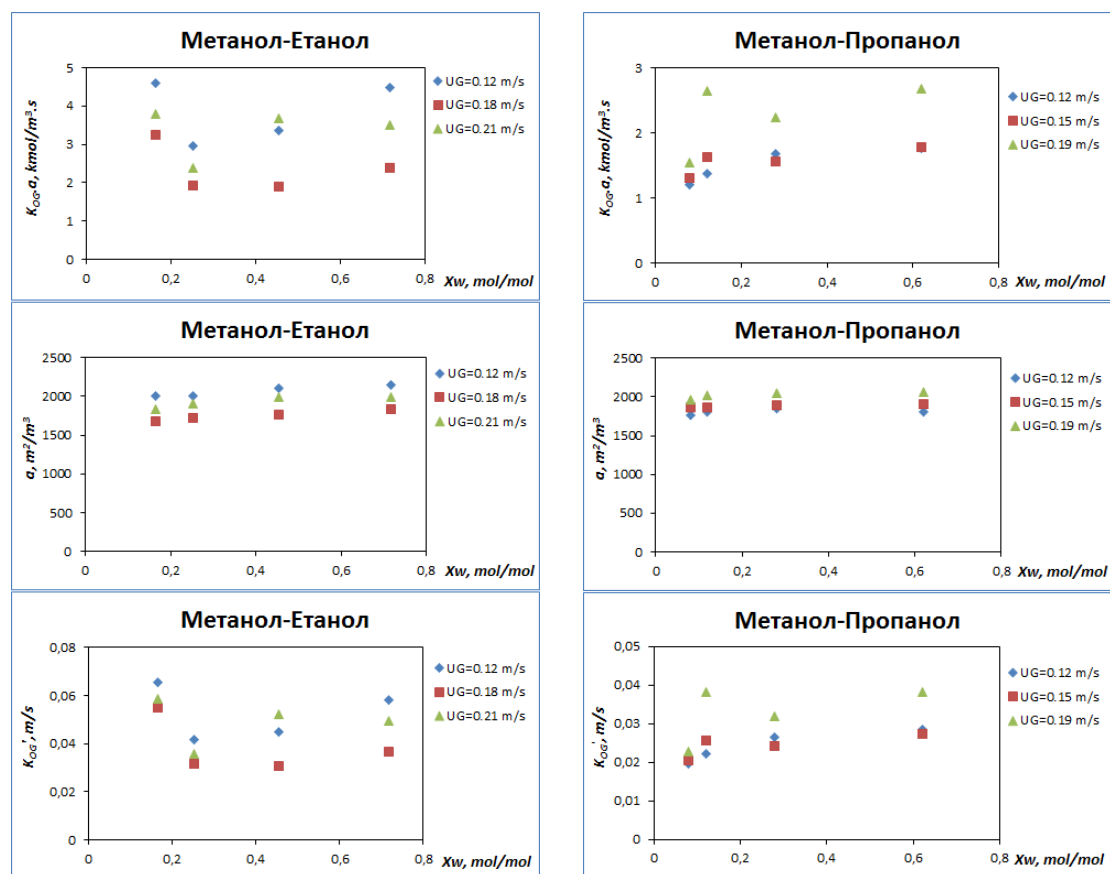
От фигурата 32 за моделната смес Бензен-Хептан се вижда че, за целия изследван концентрационен диапазон с увеличаването на стойностите на критерия на Рейнолдс от 30 до 158, общия обменен коефициент на масопренасяне за парна фаза нараства като се изменя в диапазона  $0,2 \div 2,8 \text{ kmol/m}^3 \cdot \text{s}$ , т.е. почти 10 пъти. При същото натоварване за парна фаза се изменя и специфичната обемна междуфазова повърхност като нараства от  $1500$  до  $2400 \text{ m}^2/\text{m}^3$ . За разлика от общия обменен коефициент на масопренасяне за парна фаза, коефициента на масопренасяне за парна фаза нараства само 3 пъти в диапазона  $0,015 \div 0,048 \text{ m/s}$  с увеличаване на стойностите на критерия на Рейнолдс.

От фигура 33 до фигура 45 са представени опитните данни за изменението на общия обменен коефициент на масопренасяне за парна фаза ( $K_{OG} \cdot a$ ), специфичната обемна междуфазова повърхност ( $a$ ) и коефициента на масопренасяне за парна фаза ( $K_{OG}'$ ) като функция от концентрацията на лесно летливата компонента ( $X_w$ ) за моделните смеси Метанол - Етанол, Метанол – Пропанол, Пропанол-Вода, Метанол – Вода, Дихлоретан – Пропанол, Бензен – Хептан.



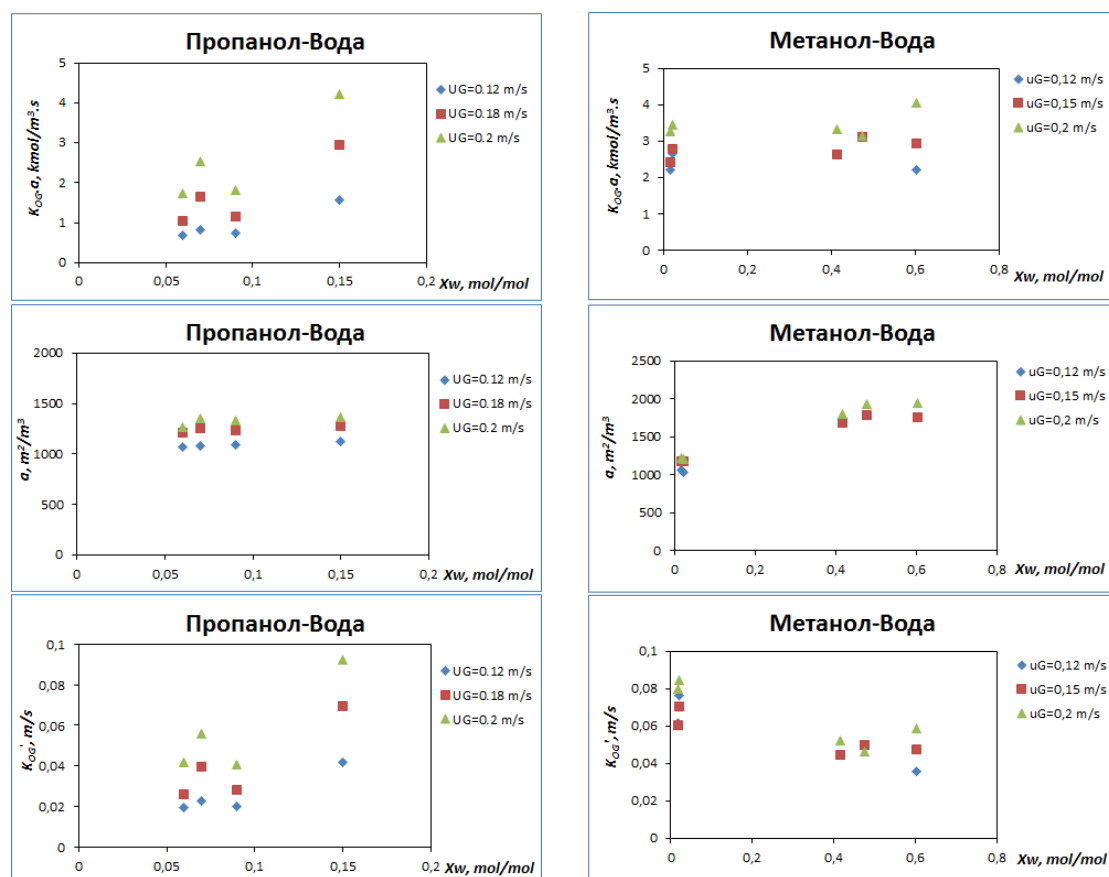
**Фиг. 32.** Зависимост на общия обменен коефициент на масопренасяне за парна фаза ( $K_{OG} \cdot a$ ), специфичната обемна междуфазова повърхност ( $a$ ) и коефициента на масопренасяне ( $K_{OG}'$ ) в зависимост от критерия на Рейнолдс респ. скоростта на парите в колоната за моделните смеси Дихлоретан-Пропанол и Бензен-Хептан.

Както се вижда за моделната смес Метанол - Етанол (фигура 33) с нарастване на концентрацията на лесно летливата компонента в куба на колоната общия обменен коефициент на масопренасяне за парна фаза както и коефициента на масопренасяне за парна фаза нарастват, като това нарастване е най-голямо при скорост на парите в колоната  $u_G=0,12 \text{ m/s}$ . Общия обменен коефициент за парна фаза се изменя като нараства два пъти в диапазона  $1,9 \div 4,5 \text{ kmol/m}^3 \cdot \text{s}$ , а коефициента на масопренасяне за парна фаза се изменя като нараства от  $0,02$  до  $0,06 \text{ m/s}$  т.е. три пъти. За целия изследван концентрационен интервал специфичната обемна междуфазова повърхност слабо нараства с нарастване на концентрацията на лесно летливата компонента като най-големи стойности има при скорост на парите в колоната  $u_G=0,12 \text{ m/s}$  и се изменя в интервала  $1600 \div 2200 \text{ m}^2/\text{m}^3$ . За моделната смес Метанол – Пропанол (фигура 33) общият обменен коефициент на масопренасяне за парна фаза нараства с увеличаване на скоростта на парите в колоната и с нарастване на концентрацията на лесно летливата компонента. Той се изменя като нараства от  $1,19$  до  $2,68 \text{ kmol/m}^3 \cdot \text{s}$  т.е. над два пъти за целия изследван концентрационен диапазон. С увеличаването на съдържанието на лесно летливата компонента коефициент на масопренасяне за парна фаза също нараства почти два пъти от  $0,019$  до  $0,038 \text{ m/s}$ , докато за специфичната обемна междуфазова повърхност увеличаването на концентрацията на лесно летливата компонента не оказва влияние и тя се запазва постоянна за целия изследван концентрационен интервал.



**Фиг. 33.** Зависимост на общия обменен коефициент на масопренасяне за парна фаза ( $K_{OG} \cdot a$ ), специфичната обемна междуфазова повърхност ( $a$ ) и коефициента на масопренасяне ( $K_{OG}'$ ) в зависимост от концентрацията на лесно летливата компонента  $X_w$  за моделните смеси Метанол-Етанол и Метанол-Пропанол.

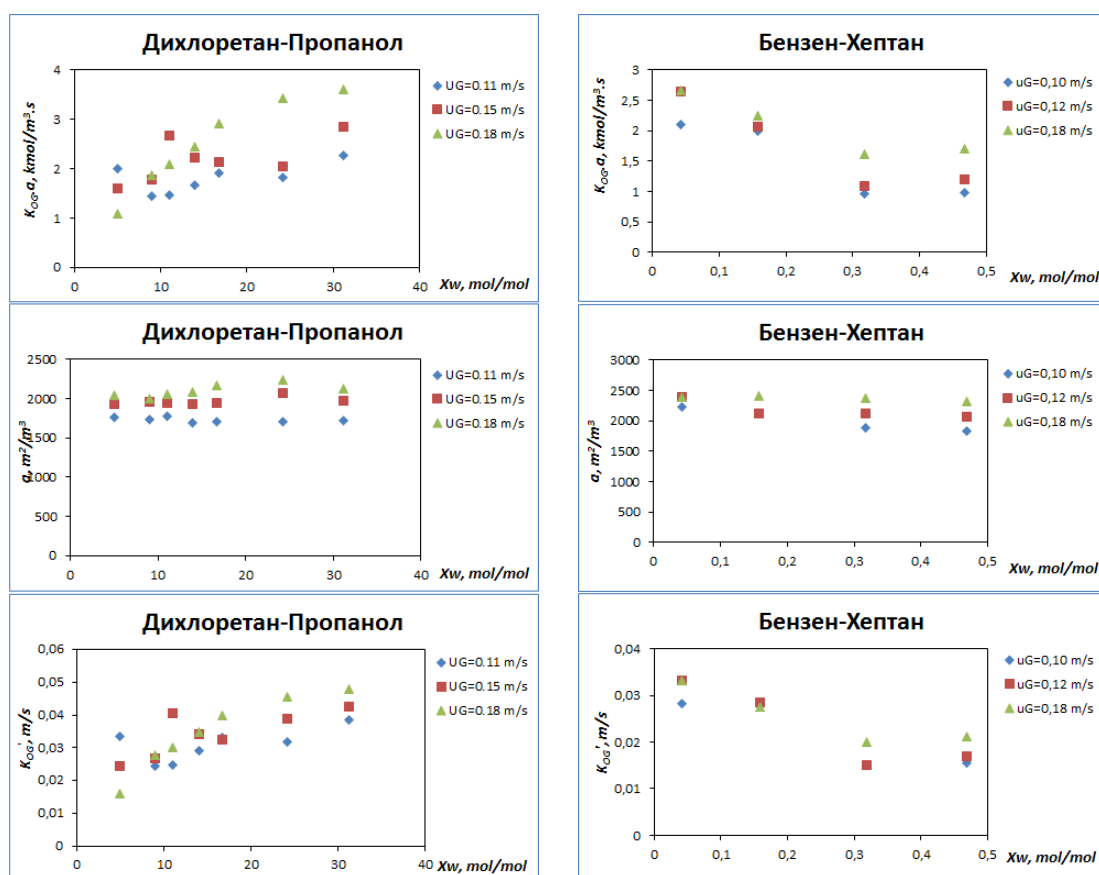
За моделната смес Пропанол - Вода фигура 34 се наблюдава нарастване на общия обменен коефициент на масопренасяне както с нарастване на концентрацията на лесно летливата компонента в куба на колоната така и с увеличаване на натоварването за парна фаза. Стойностите му се изменят като нарастват от  $0,68$  до  $4,2 \text{ kmol/m}^3 \cdot \text{s}$ , като за целия концентрационен интервал от  $0,06$  до  $0,15 \text{ mol/mol}$  най-големи стойности има при скорост на парите  $u_G=0,2 \text{ m/s}$ , а най-ниски при скорост на парите  $u_G=0,12 \text{ m/s}$ . Нарастване на стойностите на коефициента на масопренасяне за парна фаза с увеличаване на съдържанието на лесно летливата компонента се наблюдава и при трите скоростни интервала, като най-слабо е изразено при скорост на парите в колоната  $u_G=0,12 \text{ m/s}$ . Стойностите на коефициента на масопренасяне за парна фаза се изменят в интервала  $0,019 \div 0,092 \text{ m/s}$ . Както и при предните две смеси (Метанол – Етанол, Метанол – Пропанол) специфичната обемна междуфазова повърхност не се влияе от изменението на стойностите на концентрацията на лесно летливата компонента в куба на колоната. Коефициента на масопренасяне за парна фаза както и общият обменен коефициент на масопренасяне за парна фаза повишават своите стойности с нарастване на съдържанието на лесно летливата компонента в куба на колоната за моделната смес Метанол - Вода (фигура 34). За трите представени скоростни профила с нарастване на съдържанието на лесно летливата компонента общия обменен коефициент на масопренасяне за парна фаза се изменя от  $2,4$  до  $4,0 \text{ kmol/m}^3 \cdot \text{s}$ . Стойностите на коефициента на масопренасяне за парна фаза при същото натоварване за парна фаза се изменят като слабо нарастват от  $0,04$  до  $0,07 \text{ m/s}$ . От фигурата е видно че, за моделната смес Метанол - Вода нарастването на концентрацията на лесно летливата компонента в куба на колоната оказва слабо влияние върху специфичната обемна междуфазова повърхност и тя се изменя като нараства от  $1677$  до  $1950 \text{ m}^2/\text{m}^3$  за целия изследван диапазон.



**Фиг. 34.** Зависимост на общия обменен коефициент на масопренасяне за парна фаза ( $K_{OG,a}$ ), специфичната обемна междуфазова повърхност ( $a$ ) и коефициента на масопренасяне ( $K_{OG}'$ ) в зависимост от концентрацията на лесно летливата компонента  $X_w$  за моделните смеси Пропанол-Вода и Метанол-Вода.

За целия изследван концентрационен диапазон повишаването на концентрацията на лесно летливата компонента в куба на колоната при моделната смес Дихлоретан - Пропанол (фигура 35), води до нарастване на общия обменен коефициент на масопренасяне за парна фаза като при скорост на парите в колоната  $u_G=0,18 \text{ m/s}$  има най-високи стойности и се изменя в интервала  $1,09 \div 3,61 \text{ kmol/m}^2 \cdot \text{s}$ . Специфичната обемна междуфазова повърхност се запозва почти постоянна за целия изследван диапазон. Изключение прави данните снети при скорост на парите в колоната  $u_G=0,18 \text{ m/s}$ , където се наблюдава слабо повишаване на стойностите на специфичната обемна междуфазова повърхност в рамките на 12 %. Независимо от натоварването за парна фаза стойностите на коефициента на масопренасяне за парна фаза нарастват от  $0,015$  до  $0,045 \text{ m/s}$  с увеличаването на съдържанието на лесно летливата компонента в куба на колоната от  $5$  до  $31,2 \text{ mol/mol}$ . От фигурата е видно, че нарастването на стойностите на общия обменен коефициент с повишаване на концентрацията на лесно летливата компонента в куба на колоната се дължи основно на коефициента на масопренасяне, тъй като специфичната обемна междуфазова повърхност остава постоянна за целия изследван диапазон. Данните за моделната смес Бензен – Хептан са представени на фигура 35. От фигурата е видно, че с нарастването на съдържанието на лесно летливата компонента в куба на колоната от  $0,042$  до  $0,468 \text{ mol/mol}$  общия обменен коефициент на масопренасяне за парна фаза намалява своите стойности, като при скорост на парите в колоната  $u_G=0,18 \text{ m/s}$  има най-високи стойности и се изменя от  $1,62$  до  $2,65 \text{ kmol/m}^2 \cdot \text{s}$ . Специфичната обемна междуфазова повърхност слабо се влияе от изменението на съдържанието на лесно летливата компонента в куба на колоната. За целия изследван концентрационен диапазон, специфичната обемна междуфазова повърхност се изменя като слабо понижава своите стойности от  $2400$  до  $1800 \text{ m}^2/\text{m}^3$ , като за скорост на парите в колоната  $u_G=0,18 \text{ m/s}$  има най-големи стойности от  $2400$  до  $2310 \text{ m}^2/\text{m}^3$ .

С увеличаване на концентрацията на лесно летливата компонента в куба на колоната за моделната смес Бензен – Хептан коефициента на масопренасяне за парна фаза понижава своите стойности от  $0,033$  до  $0,015 \text{ m/s}$ . С нарастване на концентрацията на лесно летливата компонента в куба на колоната, при скорост на парите в колоната  $u_G=0,18 \text{ m/s}$  се получават най-високи стойности на коефициента на масопренасяне които се изменя от  $0,033$  до  $0,020 \text{ m/s}$ .

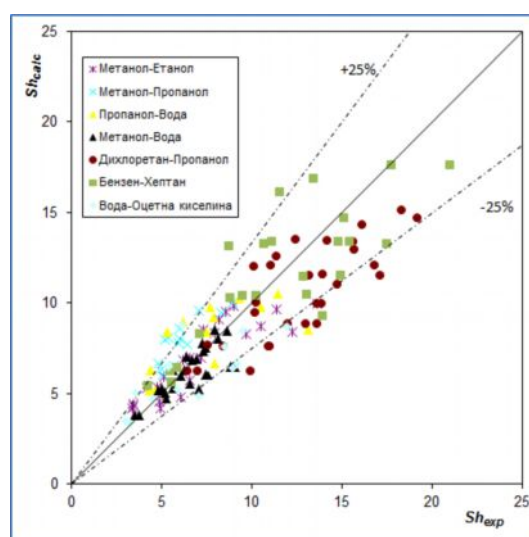


**Фиг. 35.** Зависимост на общия обменен коефициент на масопренасяне за парна фаза ( $K_{OG} \cdot a$ ), специфичната обемна междуфазова повърхност ( $a$ ) и коефициента на масопренасяне ( $K_{OG}'$ ) в зависимост от концентрацията на лесно летливата компонента ( $X_w$ ) за моделните смеси Дихлоретан-Пропанол и Бензен-Хептан.

При обработката на експерименталните данни за коефициента на масопренасяне в газовата фаза за изследваната тарелка по метода на най-малките квадрати е получено следното критериално уравнение:

$$Sh_G = 0,96 Re_G^{0.61} We^{0.002} Sc_G^{0.54} \quad (14)$$

Над 80% от данните получени по уравнение (4.5) са с максимална грешка от  $\pm 25\%$ .



**Фиг. 36.** Сравнение между експерименталните данни  $Sh_{exp}$  и изчислените данните  $Sh_{calc}$ .

## 9. Научни и научно-приложими приноси

1. Опитно е определен локалният КПД на тарелката при ректификация на моделните смеси Метанол-Етанол, Метанол-Пропанол, Пропанол-Вода, Метанол-Вода, Дихлоретан-Пропанол, Бензен-Хептан и Вода-Оцетна киселина като функция от фактора на натоварване по парна фаза, концентрацията на лесно летливата компонента в куба на колоната и височината на газо-течностния слой.
2. Определен е броя преносни единици за моделните смеси Метанол-Етанол, Метанол-Пропанол, Пропанол-Вода, Метанол-Вода, Дихлоретан-Пропанол, Бензен-Хептан и Вода-Оцетна киселина като е отчетено влиянието на фактора на натоварване по парна фаза.
3. Предложена е методика за определяне на коефициента на масопренасяне за парната фаза при ректификация на бинарни смеси. При определянето на коефициента на масопренасяне в парната фаза е отчетено влиянието на средният диаметър на мехурите в условията на пълна флегма.

4. Отчетено е влиянието на изменението на натоварването по парна фаза и съдържанието на лесно летливата компонента в куба на колоната върху общия обменен коефициент на масопренасяне за моделните смеси Метанол-Етанол, Метанол-Пропанол, Пропанол-Вода, Метанол-Вода, Дихлоретан-Пропанол, Бензен-Хептан и Вода- Оцетна киселина.
5. Върху стойностите на коефициента на масопренасяне за парна фаза е отчетено влиянието на изменението на натоварването по парна фаза и съдържанието на лесно летливата компонента в куба на колоната за моделните смеси Метанол-Етанол, Метанол-Пропанол, Пропанол-Вода, Метанол-Вода, Дихлоретан-Пропанол, Бензен-Хептан и Вода- Оцетна киселина.
6. На база на опитните данни и предложената методика с помощта на регресионния анализ по метода на най-малките квадрати резултатите са обобщени под формата на критериално уравнение като уравнението описва над 80% от експерименталните резултати с грешка  $\pm 25\%$ .

## 10. Публикации и доклади свързани с дисертацията

### А. Публикации:

1. Стефанов, Ж., **Ж. Иванов**, Ж. Тасев (2006) Кинетични коефициенти при ректификация на бинарната смес метанол-етанол в лабораторна колона, *Сб. доклади на Научна конференция с международно участие Стара загора*, т. III, 393-398.
2. **Иванов, Ж.**, Ж. Стефанов, Ж. Тасев (2006) Общ обменен коефициент на масопренасяне при ректификация на бинарни смеси, *Год. на У-т "Проф. д-р Ас. Златаров"*, Бургас, т. XXXV, кн. 1, 43-46.
3. **Ivanov, Zh. I.**, Zh. S. Stefanov (2010) Correlation between mass transfer coefficient and surface tension in sieve tray distillation laboratory column, *Asian Chemistry Letters*, 14, No 2, 83-88
4. Stefanov, Zh., **Zh. Ivanov** (2011) Gas-Liquid Mass Transfer Coefficient in Sieve Tray Laboratory Column, *Science & Technologies*, Vol. I, No. 4, 34-38.
5. **Ivanov Zh. I.**, Zh. Stefanov, B. Bogdanov (2011) Gas-side mass transfer coefficient of a laboratory column equipped with one sieve tray, *Proceedings of University of Ruse "Angel Kanchev"*, 50, book 9.1, 51-55.

### Б. Доклади:

1. Stefanov Zh., **Zh. Ivanov**, Kinetic Coefficients in rectification of the Binary Blends in Laboratory Column, *Sixth International Conference of the Chemical Societies of the South-Eastern European Countries*, 10-14 September 2008, Sofia, Bulgaria.
2. Stefanov, Zh., **Zh. Ivanov**, Gas-liquid mass transfer coefficient in sieve tray laboratory column, *Seventh National Conference on Chemistry*, Sofia, Bulgaria, 26-29 May 2011, p. 58.

## 11. Забелязани цитати

1. Karaivanova, A. Georgieva, D. Koleva, (2012) Effect of physicochemical properties of the separated mixture on the local efficiency by rectification, *Science & Technologies*, Vol. II, No. 4, 16-20.
2. Radev, D., Chr. Gentchev (2013) Determination of the specific interfacial area in laboratory column equipped with three sieve trays, *Proceedings of University of Ruse "Angel Kanchev"*, 52, book 10.1, 25-28.