

ХИМИКОТЕХНОЛОГИЧЕН И МЕТАЛУРГИЧЕН УНИВЕРСИТЕТ СОФИЯ

ФАКУЛТЕТ ПО ХИМИЧНО И СИСТЕМНО ИНЖЕНЕРСТВО
КАТЕДРА “ИНЖЕНЕРНА ХИМИЯ“

ДИПЛОМНА РАБОТА

Тема: **Числено изследване и оптимизиране на барботажен реактор с
потопена мембрана**

ОБРАЗОВАТЕЛНО КВАЛИФИКАЦИОННА СТЕПЕН: Магистър

Ръководител на катедра:
доц. д-р. инж. С. Чаушев

Научен ръководител:
гл. ас. д-р. инж. Д. Мутафчиева

Консултант:
доц. д-р. инж. В. Илиев

Дипломант:
Полина Григорова Костова,
фак. № МП0180

София, 2018

ХИМИКОТЕХНОЛОГИЧЕН И МЕТАЛУРГИЧЕН УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ

Факултет: ДМАМО

Катедра: Инженерна химия

Дата на задаване:

Утвърждавам,

Ръководител на катедра: доц.

/...../

З А Д А Н И Е

за изработване на дипломна работа на студента: Полина Григорова Костова , фак. № МП0180

специалност/изборен модул: Химично инженерство с преподаване на немски език

1.Тема:

2.Исходни данни:

3.Съдържание на дипломната работа.

3.1.Увод, цел и задачи.

3.2.Литературен обзор за периода

3.3.Обекти на изследване:

3.4.Методи за изследване /изпитване/: Компютърна симулация

3.5.Експериментални резултати.

3.6.Обсъждане на експерименталните резултати, включително графики и таблици.

Научен ръководител: гл. ас. Д. Мутафчиева

Консултант: доц. В. Илиев

София, 2018

Съдържание

Фигури.....	5
Таблицы.....	8
Означения на физичните величини.....	9
Използвани съкращения.....	10
Увод, цели и задачи	11

I. Теоретична част

1. Барботажни колонни реактори.....	13
1.1. Конструктивни особености на барботажните колони.....	13
1.2. Предимства и недостатъци на барботажните реактори.....	15
1.3. Хидродинамика на барботажен реактор.....	15
2. Газосъдържание – основни зависимости и методи за определяне	17
2.1 Значение	на
газосъдържание.....	17
2.2 Фактори,	които
газосъдържание.....	17
2.2 Фактори,	които
газосъдържание.....	17
3. CFD моделиране.....	18
3.1 Видове	гранични
условия.....	19
3.2 Предимства	и
недостатъци	на
моделиране.....	20
3.3 Модели за описание на турбулентни течения.....	20
4. Многофазни системи.....	22
4.1 Метод	Ойлер-
Ойлер.....	22
4.2 Метод Ойлер Лагранж.....	23
5. Мембранни процеси.....	24
5.1 Мембранна филтрация.....	24
5.2 Приложение на мембранната филтрация.....	25
5.3 Класификация на мембраните според размера на порите им и работното	
налягане.....	26
5.4 Характеристики на мембрана.....	27
5.5 Режими на работа на мембрана.....	28
5.6 Мембранни модули.....	29
5.7 Хидродинамични особености на реактор с потопен мембранен модул.....	30
5.8 Приложение	и
предимства	на
модул.....	30
модул.....	30

II. Експериментална част

1. Описание на изследвания обект.....	31
2. Описание на използвания софтуерен продукт.....	32
3. Изграждане на геометричен модел на барботажна колона.....	32
4. Омрежване на изследвания обект.....	34
5. Условия на експеримента.....	35
6. Параметри на експеримента.....	36
 III. Резултати и дискусия	
1. Влияние на положението на мембранный модуль върху големината на сръзващото напрежение.....	36
2. Влияние на приведената скорост на газа върху аерацията в барботажна колана с потопен мембранен модуль.....	49
IV. Изводи.....	64
V. Използвана литература.....	67

Фигури

Фиг.1 Различни конструкции на барботажни колони^[1].

Фиг.2 Различни конструкции на **смесители** (*spargers*)^[1].

Фиг.3 Режим на потоците във вертикална барботажна колона според (J. S. Groen, 2004).

Фиг.4 Изисквания за размера на мрежата в зависимост от турбулентния модел.

Фиг.5 Различни сили на взаимодействие между дисперсната и непрекъснатата фаза.

Фиг.6 Схематично представяне на разделяне на компоненти чрез мембранен процес (ляво); Частично разделяне на компоненти чрез мембрана (дясно).

Фиг.7 Запушване на мембранни пори с утаени частици (ляво), колоидни вещества, абсорбирани в порите на стените (център), слой от „динамична“ утайка, който позволява преминаването само на по-малки частици (дясно) ^[8].

Фиг.8 Схема на режим на потопено филтруране.

Фиг.9 Панели с плоска мембрана (ляво), кухо-влакнеста мембрана (дясно)^[15].

Фиг.10 Геометричен модел на барботажна колона с потопен мембранен модул.

Фиг.11 Описание на функции за създаване на 3D модел.

Фиг.12 Изследван сектор от барботажната колона с потопен мембранен модул.

Фиг.13 Автоматично генерирана мрежа от компютърната система.

Фиг.14 Стъстяване на мрежа на изследван обект.

Фиг.15 Описание на зоните на мембраната.

Фиг.16 Разпределение на скоростта на срязване по вътрешната мембрана при разстояние по височина $H=0.1\text{m}$ спрямо барботьора.

Фиг.17 Разпределение на скоростта на срязване по вътрешната мембрана при разстояние по височина $H=0.2\text{m}$ спрямо барботьора.

Фиг.18 Разпределение на скоростта на срязване по вътрешната мембрана при разстояние по височина $H=0.3\text{m}$ спрямо барботьора.

Фиг.19 Разпределение на скоростта на срязване по външната мембрана при разстояние по височина $H=0.1\text{m}$ спрямо барботьора.

Фиг.20 Разпределение на скоростта на срязване по външната мембрана при разстояние по височина $H=0.2\text{m}$ спрямо барботьора.

Фиг.21 Разпределение на скоростта на срязване по външната мембрана при разстояние по височина $H=0.3\text{m}$ спрямо барботьора.

Фиг.22 Разпределение на скоростта на срязване по вътрешната мембрана в зона 2 (активната зона) по височина $H=0.1\text{m}$ спрямо барботьора.

Фиг.23 Разпределение на скоростта на срязване по вътрешната мембрана в зона 2 (активната зона) по височина $H=0.2\text{m}$ спрямо барботьора.

Фиг.24 Разпределение на скоростта на срязване по вътрешната мембрана в зона 2 (активната зона) по височина $H=0.3\text{m}$ спрямо барботьора.

Фиг.25 Разпределение на скоростта на срязване по външната мембрана в зона 2 (активната зона) по височина $H=0.1\text{m}$ спрямо барботьора.

Фиг.26 Разпределение на скоростта на срязване по външната мембрана в зона 2 (активната зона) по височина $H=0.2\text{m}$ спрямо барботьора.

Фиг.27 Разпределение на скоростта на срязване по външната мембрана в зона 2 (активната зона) по височина $H=0.3\text{m}$ спрямо барботьора.

Фиг.28 Влияние на диаметъра на мехурите на газова фаза по дължина на вътрешната мембрана при разстояние по височина на мембранный модул $H=0.1\text{m}$ спрямо барботьора.

Фиг.29 Влияние на диаметъра на мехурите на газова фаза по дължина на вътрешната мембрана при разстояние по височина на мембранный модул $H=0.2\text{m}$ спрямо барботьора.

Фиг.30 Влияние на диаметъра на мехурите на газова фаза по дължина на вътрешната мембрана при разстояние по височина на мембранный модул $H=0.3\text{m}$ спрямо барботьора.

Фиг.31 Влияние на диаметъра на мехурите на газова фаза по дължина на външната мембрана при разстояние по височина на мембранный модул $H=0.1\text{m}$ спрямо барботьора.

Фиг.32 Влияние на диаметъра на мехурите на газова фаза по дължина на външната мембрана при разстояние по височина на мембранный модул $H=0.2\text{m}$ спрямо барботьора.

Фиг.33 Влияние на диаметъра на мехурите на газова фаза по дължина на външна мембрана при разстояние по височина на мембранный модул $H=0.3\text{m}$ спрямо барботьора.

Фиг.34 Резултати за влияние на приведената скорост на газа върху аерацията в барботажната колона при височина на мембранный модул $H=0.1\text{m}$ и диаметър на мехурите на газовата фаза-3mm.

Фиг.35 Резултати за влияние на приведената скорост на газа върху аерацията в барботажната колона при височина на мембранный модул $H=0.1\text{m}$ и диаметър на мехурите на газовата фаза-6mm.

Фиг.36 Резултати за влияние на приведената скорост на газа върху аерацията в барботажната колона при височина на мембранный модул $H=0.1\text{m}$ и диаметър на мехурите на газовата фаза-9mm.

Фиг.37 Резултати за влияние на приведената скорост на газа върху аерацията в барботажната колона при височина на мембранный модул $H=0.2\text{m}$ и диаметър на мехурите на газовата фаза-3mm.

Фиг.38 Резултати за влияние на приведената скорост на газа върху аерацията в барботажната колона при височина на мембранный модул $H=0.2\text{m}$ и диаметър на мехурите на газовата фаза-6mm.

Фиг.39 Резултати за влияние на приведената скорост на газа върху аерацията в барботажната колона при височина на мембранный модул $H=0.2\text{m}$ и диаметър на мехурите на газовата фаза-9mm.

Фиг.40 Резултати за влияние на приведената скорост на газа върху аерацията в барботажната колона при височина на мембранный модул $H=0.3\text{m}$ и диаметър на мехурите на газовата фаза-3mm.

Фиг.41 Резултати за влияние на приведената скорост на газа върху аерацията в барботажната колона при височина на мембранный модул $H=0.3$ и диаметър на мехурите на газовата фаза-6mm.

Фиг.42 Резултати за влияние на приведената скорост на газа върху аерацията в барботажната колона при височина на мембранный модул $H=0.3\text{m}$ и диаметър на мехурите на газовата фаза-9mm.

Фиг.43 Сравнение на стойностите на скоростта на срязване по вътрешната мембрана при различна приведена скорост на газа и еднакво разстояние по височина на вътрешната мембрана $H=0.1\text{m}$ спрямо барботьора за еднакъв диаметър на мехурите на газовата фаза – 3mm.

Фиг.44 Сравнение на стойностите на скоростта на срязване по външната мембрана при различна приведена скорост на газа и еднакво разстояние по височина на външната мембрана $H=0.1\text{m}$ спрямо барботьора за еднакъв диаметър на мехурите на газовата фаза – 3mm.

Фиг.47 Влияние на диаметъра на мехура върху скоростта на срязване по вътрешната мембрана при различна приведена скорост на газа.

Фиг.48 Влияние на диаметъра на мехура върху скоростта на срязване по външната мембрана при различна приведена скорост на газа.

Таблицы

Таблица 1. Класификация на мембранните процеси.

Таблица 2. Предимства и недостатъци на панел с плоска мембрана и кухо-влакнеста мембрана.

Означения на използваните физични величини

ε_G - газосъдържание, -

V_G - обем на газова фаза, m^3

V_L - обем на течна фаза, m^3

τ - време, s

A- сечение на възходящата тръба на реактора, m

H- височина на реактора, m

ρ – плътност, kg/m^3

$\bar{\tau}$ - тензор на напрежения

μ - динамичен вискозитет, Pa.s

p - налягане, Pa

v – скорост, m/s

$\mu^{(t)}$ - турбулентен вискозитет, Pa.s

Използвани съкращения

БРПМ - барботажен реактор с потопена мембрана

CFD - изчислителната динамика на флуидите

ГУ- гранично условие

RANS - Reynolds averaged Navier-Stokes

PSD (Particle Size Distribution) – разпределение на частиците по големина

PBE (Population Balance Equation) – масови балансови уравнения

MF- микрофилтрационни мембрани

UF - ултрафилтрационни мембрани

NF - нанофилтрационни мембрани

RO - мембрани за обратна осмоза

TMP - транс-мембранно налягане

NOM - естествените органични вещества

Увод, цели и задачи

Барботажните реактори с потопена мембрана (БРПМ) стават все по-подходяща алтернатива за конвенционално пречистване на отпадъчни води. БРПМ са успешно използвани за аеробно биологично пречистване на отпадъчни води, което води до трайно решаване на проблема за ефективното разделяне на твърди частици от течности. Оптимизирането на БРПМ изисква задълбочени познания за смесването, биокинетиката, както и за причините водещи до замърсяване и запушване на мембраната.

Актуалността на представената дипломна работа се състои в това, че в дадения момент само технологията с използване на мембранни реактори позволява радикално да се усъвършенстват техникоикономическите характеристики на процеса на биологическо пречистване на отпадъчни води и едновременно се явява и решение на проблема на допълнителното доочистване.

Проектирането на БРПМ става главно на базата на познаване на биокинетиката и на условията, при които настъпва запушването на мембраната, въпреки че хидродинамиката в БРПМ е от решаващо значение за работата на тези реактори. Следователно влиянието на режима на потока в процеса на проектиране и работа на БРПМ не е достатъчно изучен и анализиран. Настоящите методи на проектиране на желан работен режим на потока в рамките на БРПМ до голяма степен се основават на емпирични техники (*например: на специфичната енергия на смесване*). Трудно е да се предскаже как мащабирането на апарата и проектирането на промишлени инсталации (*например: размер и положение на входове, прегради или мембранна ориентация*) ще повлияят на хидродинамиката и следователно на цялостно изпълнение на барботажния реактор с потопена мембрана.

Напоследък все повече и повече проучвания използват **CFD** (*изчислителна динамика на флуидите*) техники за изследване и моделиране на потока на течността през мембранен модул и за изследване на факторите, които предизвикват замърсяването на мембраната. CFD е широко използван инструмент за изследване на замърсяването на мембраната и за проучване на механизмите и факторите, които влияят на този процес. Изчислителната динамика на флуидите дава възможност за предсказване на това как геометричните характеристики и работните параметри на барботажния реактор с потопена мембрана ще повлияят на хидродинамиката и на избора на оптималната конструкция и следователно и производителност на БРПМ.

Целта на настоящата дипломна работа е да се разработи CFD модел на двуфазен поток около потопения мембранен модул, в който да се отчита мембранната конфигурация и условията на аерация. Както и да се разкрият някои ключови хидродинамични фактори, водещи до сериозно замърсяване на мембраната чрез изследване на ефекта на аериращата система върху скоростта на потоците, върху разпределението на напреженията на повърхността на мембраната и оптимизиране на БРПМ.

Наличието на газ и сблъсъкът на газовите мехурчета с повърхността на мембраната имат положителен ефект върху намаляване на **замърсяването** (*fouling*), което в голяма степен зависи от условията на работа и от размера на мехурите.

За изследване на този ефект се провеждат компютърни симулации за анализиране на структурата на флуидния поток около повърхността на мембраната при различна локализация на мембраната спрямо барботьора.

Настоящата дипломна работа се фокусира върху условията на работа, размерите на мехурчетата и геометрията на мембранните модели, както и тяхното влияние върху скоростта на срязване.

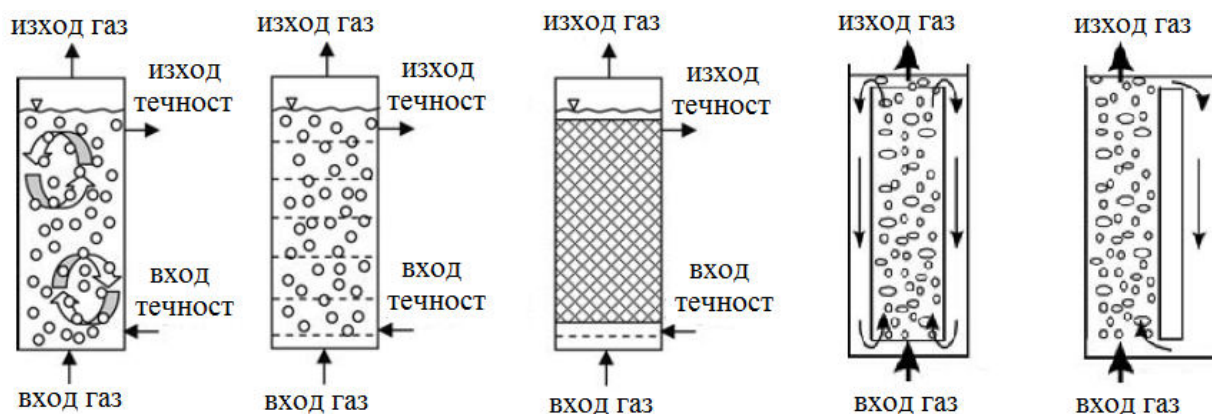
За изработването на настоящата дипломната работа бяха поставени следните задачи:

1. Разработване на динамичен математичен модел чрез комбиниране на уравнението на Navier-Stokes и уравнението на Darcy's за течение в порьозна среда с помощта на ANSYS CFX, Student Edition 19.0.
2. Компютърни симулации на хидродинамичното поведение около мембраната повърхност при различна локализация на мембраната спрямо барботьора.
3. Оценка на ориентацията на мембраната и на разстоянието от барботьора до мембранный модул т.е. височината на смесване на газът и течността и на нейното влияние върху разпределението на скоростта около мембранната повърхност.
4. Оценка на ориентацията на мембраната и на разстоянието от барботьора до мембранный модул, т.е. височината на смесване на газът и течността и на нейното влияние върху разпределението на скоростта около мембранната повърхност.
5. Отчитане на влиянието на газовите мехурчета върху скоростта на срязване по повърхността на мембраната и на положителния ефект на аерирането за намаляване на замърсяването на мембраната.

Теоретична част

1. Барботажни колонни реактори

Барботажните колонни реактори или само **барботажни колони** (*bubble columns*) са апарати, в които газ под формата на мехурчета влиза в контакт с непрекъсната течна фаза. Целта на този контакт може да бъде само разбъркване на течната фаза, но също така може да има и масопренос на вещества от едната в другата фаза. Последното е много често използвано при химичните реакции протичащи в течна фаза. Течната фаза е възможно да съдържа твърди инертни частици, каталитично активни течни и твърди вещества, както и реагенти. Най-честите реакции и производства в барботажни колони са оксидация, хидрогениране, халогениране, алкилиране, различни биохимични и биотехнологични процеси, озониране, ферментационни процеси, обработване на отпадни води, хидрометалургични процеси, разбъркване на течни стомани и пр. ^[1,2]



а) обикновена конструкция; б) с решетъчни тарелки; в) с пълнеж; г) еърлифт реактор с вътрешна циркулация; д) еърлифт реактор с изнесена циркулационна тръба.

Фиг.1 Различни конструкции на барботажни колони ^[1].

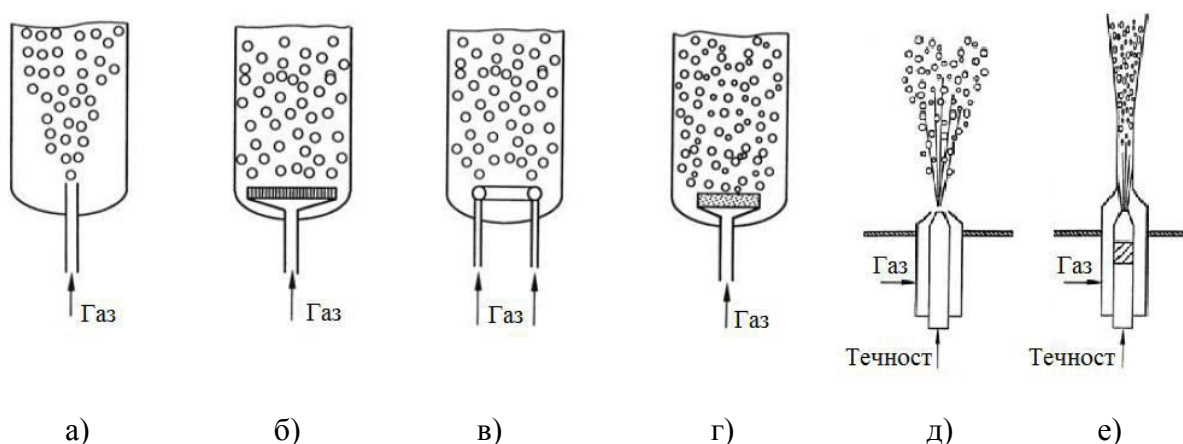
1.1 Конструктивни особености на барботажните колони

Мащабите на тези апарати варират от 100 – 300 m³ при високотонажните производства до най-големите апарати за пречистването на отпадни води с обеми до 20 000 m³. Съществуват много различни решения в оформлението на барботажните колони. Най-простите (Фиг. 1а) са с подаване на газа в дъното на колоната с последващо изплуване нагоре по височината към свободната повърхност. Течността може да се движи, както в правоток, така и в противоток на газовата фаза.

В биотехнологичните производства се използват широко колони с периодично действие, при които течната фаза не протича през апарата постоянно, а само се подменя през определен период от време. Газът подаван в колоната представлява смес от чист и рециркулиран газ. Този прост тип конструкция се използва сравнително рядко в практиката. Най-използваните в практиката колони са тези с тарелки (Фиг.1 б)) и пълнеж (Фиг.1 в)). Разбира се съществуват и още по-сложни конструкции, но те се използват в специални случаи.

Отделен клас барботажни колони са апаратите, в които е обособена зона за циркулация на течността. Тези апарати се наричат **сърлифт реактори** (*air-lift loop reactors*). При тях е възможно да има, както вътрешна циркулация на течността (Фиг. 1 г)), така и да бъдат с изнесена циркулационна тръба (Фиг. 1 д)). Най-често този тип апарати намират приложение при биологичното третиране на отпадни води.

Обичайно, газът се диспергира при въвеждането си в колоната, като целта е да се създадат малки газови мехурчета, които са равномерно разпределени по напречното сечение на апарата, като по този начин се постига по-добро разбъркване на течността и се интензифицира масообмена. Мехурчетата се получават чрез пропускането на газа през отвори или порьозна среда или чрез смесването на газа с бърза струя течност. Устройствата използвани в първите два случая се наричат **статични смесители** (*static spargers*) и са показани на Фиг. 2 а)-г). При тях образуването на мехурчетата става без да се внася някаква допълнителна енергия отвън. Най-използваните конструкции са тези с перфорираната тарелка и перфорираната тръба. Ако е желателно да се получат много малки мехурчета, тогава се използват и порьозни плоскости. Другият тип устройства се наричат **динамични смесители** (*dynamic spargers*) и при тях се използва енергията на течната струя за диспергирането на газа. Най-използваните конструкции от този тип са т.нар. двуфазна струйна дюза и ежекторите и са показани на Фиг. 2 д) и 2 е).



От а) до г) – статични; д) и е) динамични. а) тръба; б) перфорирана тарелка; в) перфорирана тръба; г) порьозна плоча; д) двуфазна струйна дюза; е) ежектор.

Фиг.2 Различни конструкции на **смесители** (*spargers*)^[1].

1.2 Предимства и недостатъци на барботаажните реактори

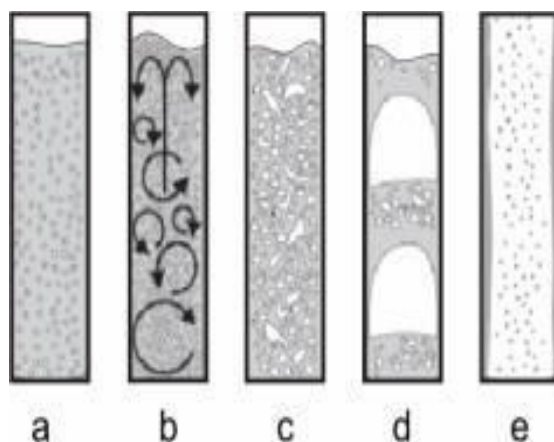
Реакционните апарати от барботаажен тип имат сравнително опростена конструкция и са твърде разпространени апарати, реализиращи газотечни реакции. При тях газът посредством мехурчета преминава през слоя течност. В повечето случаи тези реактори представляват вертикални цилиндрични съдове или колони, запълнени с течност съоръжени с барботиращо устройство в долната част. Газът се подава през барботьора във вид на мехурчета преминаващи през слоя течност. В пространството над повърхността на течността (отстойната камера), газът се освобождава от капките преди напускане на апарата. За пълното отделяне на газа от течността често се монтира допълнителна камера или допълнително устройство. За поддържане на определена температура в повечето случаи апаратът е снабден с риза или се използват изнесени топлообменници. Такъв тип реакционни апарати са особено подходящи за провеждане на бавни реакции, протичащи в кинетичната област. Такива са болшинството от реакциите в органичния синтез. В тези апарати се осигурява добър контакт на фазите и достатъчно смесване, необходимо за равномерно протичане на реакциите в целия обем. Техният недостатък е голямото хидравлично съпротивление и необходимостта от нагриване на големи течностни маси при напускане на апарата ^[3].

1.3 Хидродинамика на барботаажен реактор

Режим на двуфазни потоци- хидродинамиката, смесването на фазите и масопреносните параметри в газотечните реактори силно зависят от преобладаващия режим на течение на двуфазния поток. Много изследователи (Zahradník et al, 1997; Letzel et. al., 1997; Vial et. al, 2000; Ruzicka et. al, 2001; Olmos et. al, 2003; Groen, 2004, Ruthiya et. al, 2005) изучават характера на движение на потоците, които преобладават в тези реактори. Според (Groen, 2004 Camarasa et al, 1999 и Vial et al., 2001) в барботаажните реактори съществуват следните режими представени на фиг.3:

- **Хомогенен (барботаажен, мехурест) поток** – при него газовата фаза се състои от малки мехури с приблизително еднакви размери, всеки от които се движи самостоятелно и повечето от тях във вертикална и в много малка степен в хоризонтална посока без да си пречат взаимно. Скоростта на газа, обикновено е по-малка от 0,5 m/s и взаимодействия между мехурите са слаби. При тези условия, газовите мехурчета не оказват влияние на движението на течната фаза и тя се разбърква слабо. Коалесценцията и дробенето на газовите мехури в обема е незначително и следователно размерът им се определя от типа и устройството на газоразпределителя и физичните свойства на системата газ-течност. В реактора няма интензивна циркулация.

- **Турбулентен поток** – настъпва тогава, когато взаимодействията между издигащите се мехури започват да стават значителни. Хомогенният слой от мехури става нестабилен, появяват се много на брой струпвания на мехури, които съществуват за кратко време. Течната фаза се издига посредством големия брой струпвания на мехури и започва да циркулира – да се изкачва нагоре от центъра на колоната и да се спуска надолу в областта около стената.
- **Хетерогенен режим** – наблюдава се тогава когато голяма част от потока от издигащи се мехури се дължи на коалесценцията между тях. Мехурите с големи размери преобладават като голяма част от тях са много деформирани. Дисперсията и обратното смесване при този режим са определящи.
- **Пръстеновиден поток** – дължи се на много висока скорост на газовата фаза. Газовият поток преминава през централната част на колоната, а течният, под формата на тънък слой – покрай стената.



a – хомогенен поток; b – турбулентен поток; c – смесен поток; d – тампонен поток;
e – пръстеновиден поток.

Фиг.3 Режим на потоците във вертикална барботажна колона според (J. S. Groen, 2004).

По-важните параметри при проектирането и експлоатацията на барботажните колони са:

- размер на мехурчетата;
- скорост на изкачване на мехурчетата;
- процентно съдържание на **газовата фаза** (*gas holdup*);
- специфична междуфазна повърхност;
- коефициенти на масопренос.

2. Газосъдържание – основни зависимости и методи за определяне

Газосъдържанието е един от най-важните параметри, които се използват за описание на газотечните системи. Газосъдържанието ε_G се дефинира като обема на газовата фаза V_G , отнесен към целия обем на двуфазната смес ($V_G + V_L$) и се дава със следната формула:

$$\varepsilon_G = \frac{V_G}{V_G + V_L}, \quad (1)$$

т.е. газосъдържанието е обемната фракция на газовата фаза в газотечната система и може да се приеме за постоянно във всяка точка от газотечната смес, като изключение прави само горният слой, състоящ се от устойчива пяна.

Някои автори (Groen, 2004) разглеждат ε_G като вероятност мехурът да съществува на определено място и в определен момент от време. Газосъдържанието определя още времепрестоя на газа в течността и може да се определи от времепрестоя на газа в колоната или с други думи, мехурите се нуждаят от определено време τ , за да преминат от разпределителя до върха на колоната:

$$\varepsilon_G = \frac{V_G \tau}{A.H} \quad (2)$$

2.1 Значение на газосъдържание

Газосъдържанието е важен параметър при дизайна и мащабирането на газотечностните реактори (Nicolella et al., 1998; Jin et al., 1999, 2001), тъй като:

- Стойността му дава индикация за потенциала на масопреноса, тъй като за дадена система по-голямото газосъдържание означава по-голяма междуфазна повърхност;
- Колкото по-голяма е стойността на ε_G , толкова повече е времепребиваването на газа в реактора, респ. времето за контакт между газа и течността в реактора.

2.2 Фактори, които влияят на газосъдържание

Стойността на газосъдържанието се определя от много и различни фактори, като:

- дизайна на барботьора;

- работните променливи - налягане, скорост на газа, температура, както и физичните свойства на газовата и течната фаза;
- скоростта на аериране и въведената мощност при реакторите с бъркачка ^[4].

3. CFD Моделиране

Основният подход при CFD моделирането е да се използват балансовите уравнения за маса, импулс и топлинна. За тези цел се приема, че изменението на величините във всяка от изследваните фази е непрекъснато, т.е. пренебрегва се дискретния характер на материята и енергията.

Уравнение на непрекъснатостта. Основен физичен закон е този за съхранение на масата, от него се получава и т.нар, уравнение на непрекъснатостта:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla(\rho \vec{v}) \quad (3)$$

където плътността ρ е транспортната величина.

Уравнение на движението (Навие-Стокс). Скоростта на флуидното течение е основна величина в CFD и тя се определя от уравнението на движението популярно още, като уравнение на Навие-Стокс:

$$\frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} = -\nabla(\rho \vec{v} \vec{v}) - \nabla \bar{\tau} - \nabla p + \rho \vec{g} \quad (4)$$

Тук скоростта сама по себе си не е транспортната величина – такава величина е импулса $\rho \vec{v}$. Тензорът на напреженията $\bar{\tau}$ играе ролята на дифузионния член и е функция от градиента на скоростта.

За Нютонов флуид $\bar{\tau}$ има вида:

$$\bar{\tau} = \mu[\nabla \vec{v} + (\nabla \vec{v})^T] + \left(k - \frac{2}{3}\mu\right)(\nabla \cdot \vec{v})\delta \quad (5)$$

където μ е динамичния вискозитет на флуида, който зависи от тангенциалното напрежение τ и времето t за Нютонови флуиди. Последните два члена в Урав. (4) са градиента на налягането p и силата на гравитацията $\rho \vec{g}$. В някои специални случаи могат да присъстват и други сили действащи върху флуида, като електромагнитни или центробежни сили и пр. Две неща затрудняват числената процедура с това уравнение –

едното е нелинейната структура на конвективния член, а другото е налягането. Налягането няма свое балансово уравнение и за свиваеми флуиди се използва допълнително уравнението на състоянието ($\rho = p/(RT)$), чрез което се изчислява налягането, тъй като плътността се получава от уравнението на непрекъснатостта. Съвместното решаване на тези три уравнения (това на непрекъснатостта, на състоянието и това на Навие-Стокс) дава полетата на плътността, налягането и скоростта.

За несвиваеми флуиди плътността е постоянна величина и уравнението на състоянието не може да се използва за определянето на налягането.

Налягането в този случай се получава от съвместното решаване на уравненията на непрекъснатостта и на движението, като се изисква стойностите на налягането и на скоростта да удовлетворяват едновременно и двете уравнения. Това обикновено се получава чрез използването на двуетапна процедура – първо се приема някаква стойност за градиента на налягането и с тази стойност се изчислява скоростта, а след това се прави корекция на налягането и така итеративно се получават p и $\vec{v}$ (това е т.нар. *predictor-corrector алгоритъм*).

3.1 Видове гранични условия

- **вход** (*inlet*) – задават се стойностите на всичките транспортни величини на входа на изчислителната област. Разбира се могат да се задават и функционални зависимости, така например може да се зададе характерния параболичен профил при ламинарно течение;
- **изход** (*outlet*) – за този тип гранично условие обикновено се задава налягането, а скоростта се изчислява;
- **стена** (*wall*) – повечето моделирани системи са обградени от твърда стена, която може да бъде както неподвижна, така и подвижна. За стените се приема, че през тях няма пренос на маса, т.е. те са непроницаеви, но могат да провеждат топлина.

За целта компонентата на скоростта нормална към повърхността на стената е равна на нула при неподвижни стени и равна на скоростта на стената при подвижна стена.

- Освен това най-често се приема че тангенциалната компонента на скоростта е нула (това е т.нар. no-slip BC). Когато се решава т.нар. спрегната топлообмена задача се налага да се окажат и температурните гранични условия на стената, например адиабатна стена или стена която топлообменя с околната среда;

- **гранично условие за симетрия** (*symmetry*) – при някои задачи имаме симетрия около някоя повърхнина, при това положение може да се разглежда само едната област около тази повърхнина, което спомага за по-бързото решаване на задачата. За да имаме **гранично условие** (*ГУ*) за симетрия е необходимо да съществува не само геометрична симетрия, но и физична такава по отношение на всичките транспортни величини.

3.2 Предимства и недостатъци на CFD моделиране

Все по-голям брой разработки и публикации се занимават с приложението на CFD за барботажни двуфазни потоци ^[5] ^[6]. Wild et al. ^[5] цитират най-важните причини за този нарастващ интерес:

- Усъвършенстване на измервателната техника-прилаганите към локалната хидродинамиката в барботажните колони измервателни методи претърпяха голям напредък, така че по-надеждни хидродинамични измервания вече са на разположение, за да се провери адекватността на числените резултати получени от CFD симулациите.
- Увеличаване на компютърния капацитет.
- Подобро качество на различни CFD програмни системи: по-добри числени методи, по-реалистични затварящи **гранични условия** (*closure laws*).
- Неизяснената, сложна хидродинамика на режимите на потока, на променящата се газотечна междуфазна повърхност и липсата на знания за затварящите условия (турбулентност, сблъсък между мехурите) превръща изследването и изучаването на барботажните колони в еталон за всички газотечностни дисперсни потоци.

3.3 Модели за описание на турбулентни течения

Турбулентни течения. Турбулентният поток, има вихрова структура, при което се различават едромасштабни и дремномасштабни вихри. При преноса на импулс участват всички видове вихри. Най-големите вихри имат мащаб от порядъка на основното течение. В процеса на турбулентен пренос те се разпадат на по-малки вихри, които от своя страна се разпадат на още по-малки, докато се стигне до вихри с такъв малък мащаб, че върху тях започва да влияе вискозитета и кинетичната им енергия, чрез вискозното триене се превръща в топлинна. Този процес се нарича вискозна дисипация на механичната енергия. Съществува, следователно, цяла каскада на пренос в турбулентните потоци. Предложеното от Рейнолдс разделяне на турбулентното течение на осреднено, “псевдоламинарно” и пулсационно има определен физичен смисъл, който го отличава от ламинарното течение. Така например, ние можем да въведем за осредненото течение

линии на тока успоредни на стените и да го разглеждаме като слоесто, но не трябва да забравяме, че тези слоеве са проникваеми за пулсационните съставки, които пренасят от едно място на друго крайни обеми от течност наречени **“моли”** със съответните им количество движение, енергия и маса.

Първата полуемпирична теория за турбулентния пренос е теорията на **Бусинеск (Boussinesq)**. По аналогия с ламинарните течения той въвежда т.н. **турбулентен вискозитет**:

$$\tau_{xy}^{(t)} = -\mu^{(t)} \frac{dv_x}{dy} \quad (6)$$

Голямата трудност при решаването на задачи с турбулентност е, че за да се „обхванат“ тези високочестотни флуктуации е необходимо да се използват мрежи с много малки размери и много малки стъпки във времето. Броят на клетките N необходими за пълна тримерна турбулентна симулация е равен на

$$N = 5^3 \text{Re}^{9/4} \quad (7)$$

където Re е критерия на Рейнолдс за съответното течение.

Първоначално стойността на $\mu^{(t)}$ е считана за постоянна, което е твърде далеч от реалната физическа картина на процеса

Сериозен напредък в развитието на теорията на турбулентността е направено с хипотезата на Прандтл за пътя на смесване. Прандтл изхожда от аналогията между преноса в ламинарния поток, който се извършва чрез хаотично движение на молекулите, и турбулентния пренос, който се извършва чрез хаотично движение на крайни по обем **“моли”**. За разлика от молекулите, молите са временни образowania. Те възникват, съществуват определено време, при което се движат хаотично, пресичайки отделните **“слоеве”** на осредненото псевдоламинарно течение и се разрушават. През време на своето съществуване молът не взаимодействува с околната течност. При неговото разпадане неизбежно възниква пулсация. Решението на турбулентните проблеми се свежда до определяне на турбулентните вискозитет.

За целта са съставени модели за турбулентност, базиращи се на приблизителни емпирични уравнения. Потребителят трябва да избере един от моделите на турбулентност.

По-долу са показва най-често използваните модели за описание на турбулентните течения:

- **Zero Equation Model - Алгебричен модел - без диференциални уравнения**

Предимства на модела - прост за пресмятане

Недостатъци на модела- не дава добри резултати при наличие на циркуляционни зони и работи при по-проста геометрия.

- **One equation model: k- модел, μ - модел**
- **Two equation models k- ϵ модели, k- ω**

Съгласно **k- ϵ** модела се приема, че течението е напълно развито турбулентно, като наред с това ефектите на молекулярния вискозитет са пренебрежими. Поради тази причина той се прилага успешно в практиката за напълно развити турбулентни течения ^[7]. Предимства на **k- ϵ** модела- дава реалистична картина, особено при турбулентни течения в тръби и канали.

Недостатъци на **k- ϵ** модела - Използването му в някои случаи води до “преувеличение” на турбулентността на потока.

- **Reynolds stress models** наречен **RANS** (*Reynolds Averaged Navier Stokes*).

При RANS модела всичките транспортни величини се осредняват за всичките турбулентни флукутации във времето, което позволява използването на относително груби мрежи за голям брой системи, при това не са необходими големи изчислителни ресурси. Влиянието на турбулентността се отразява с допълнителни уравнения в модела. Осредняването при RANS се основава на факта, че големините на турбулентните флукутации и останалия поток се различават значително. Поради това Рейнолдс е предложил параметрите на течението да се разглеждат като сума от две съставлящи: *осреднена във времето съставляща и пулсационна съставляща*.

Горните турбулентни модели на турбулентност, с изключение на Zero Equation Model, в граничните слоеве флуид/стена се комбинират с модели за граничния слой.

K- ϵ моделът на турбулентност не е валиден директно за граничния слой. За крайните елементи в близост до стената в ANSYS се използват няколко модели за турбулентните гранични слоеве.

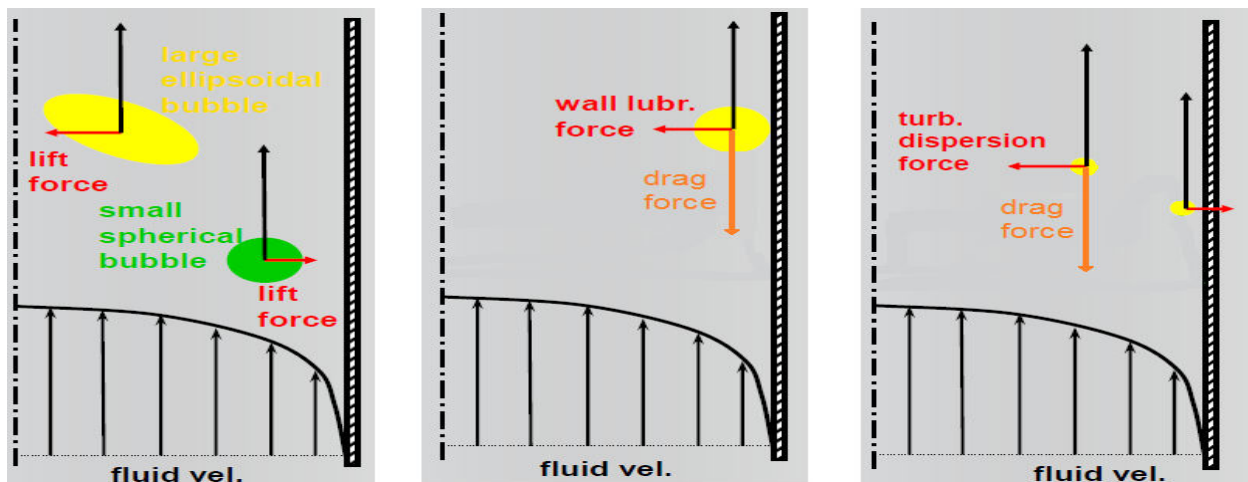
4. Многофазни системи

Методите за моделиране на многофазни дисперсни системи в CFD са два – метод Ойлер-Ойлер и метод Ойлер-Лагранж.

4.1 Метод Ойлер-Ойлер

Методът Ойлер-Ойлер е предпочитания метод за моделиране на системи с относително големи стойности на обемните части на дисперсните фази, а също така и за системи с относително големи по размери частици на дисперсните фази. Трябва да се отбележи, че промените в турбулентността вследствие взаимодействието на фазите не са все още добре развити. **Разпределението на частиците (PSD)** може да бъде описано само с големи изчислителни усилия, защото повечето сили на междофазово взаимодействие са функция

на PSD, поради което частиците с различни размери се обособяват в отделни класове (*size classes*) и всеки такъв клас се третира като отделна фаза. Транспортните уравнения при този метод са същите както за еднофазните системи, но са умножени с обемните части на съответната фаза и са добавени някои източникови членове, които да отразят междуфазовите взаимодействия. За уравнението на движението такива взаимодействия са сили. За всичките системи, при които има относителна скорост между отделните фази **силата на съпротивлението** (*drag force*) е от най-голямо значение. Това е основната сила, която предотвратява непрекъснатото увеличаване на относителната скорост между фазите. Други сили, които се вземат предвид в зависимост от свойствата на отделните фази са: силата възникваща при относителното ускорение между фазите, т.нар. виртуална (придадена) **масова сила** (*virtual mass* или *added mass force*); сила на Басет; **подемната сила** (*lift force*), както и други сили възникващи в различни точки на частиците поради различните скорости на фазите (например, сила на Сафман, сила на Магнус и пр.) (Фиг. 5). За системи, при които има значителен масообмен през междуфазовата повърхност трябва да се отчете, че има също и пренос на импулс и топлина. Това става чрез допълнителни членове в уравненията на непрекъснатостта, движението и енергийното уравнение.



Фиг.5 Различни сили на взаимодействие между дисперсната и непрекъснатата фаза.

4.2 Метод Ойлер-Лагранж

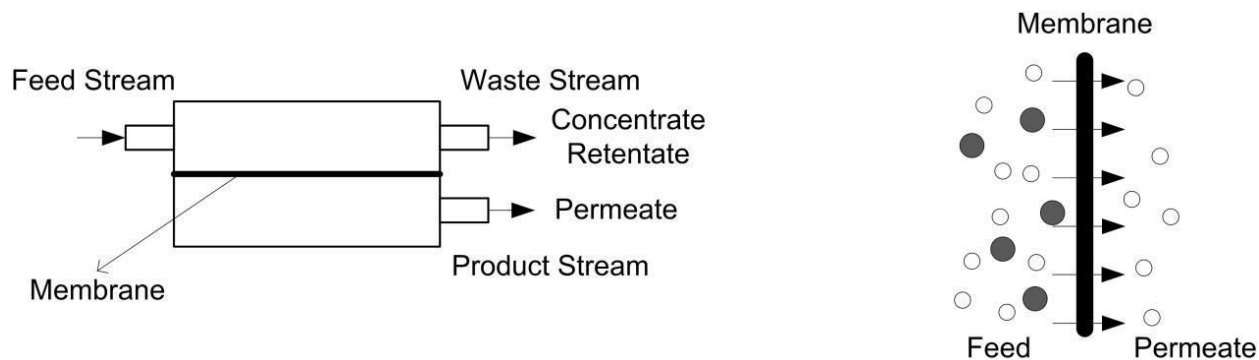
При този подход за моделиране на дисперсни многофазни системи непрекъснатата фаза се моделира с познатите уравнения за еднофазна система с добавени членове отразяващи взаимодействията между фазите. Докато дисперсната фаза се моделира по различен начин. Частиците се разделят на отделни групи, които се разпределят по такъв начин в изследваната област, че да дават представа за обемните части и свойства на дисперсната фаза. Преносът на маса и енергия също трябва да бъдат отчетени. Обемът на отделните групи с частици не може да бъде по-голям от размера на най-малката клетка на мрежата. При по-големи обемни части на дисперсната фаза е възможно да има повече от една група с частици в една клетка във всеки един момент от време, поради това този метод се

използва за малки сумарни обемни части на всичките дисперсни фази – до около 1-2 %, и изключително рядко в някои случаи до 5 %. Освен това изчислителните усилия се повишават много с увеличаването обемните части на дисперсните фази, защото е необходимо да се увеличи и броя на групите с частици, поради тези причини този метод се използва по-рядко в практиката в сравнение с метода Ойлер-Ойлер. Но от друга страна този метод предоставя по-добри модели за влиянието на частиците върху турбулентността. Освен това чрез дефинирането на групи с различни свойства дава възможност да се моделира PSD с много малко допълнителни усилия. Идеалният вариант би бил да се извършват симулации на една и съща система и с една и съща мрежа и по двата метода за моделиране на дисперсни многофазни системи.

5. Мембранни процеси

5.1 Мембранна филтрация

Една мембрана представлява пермус-селективен слой, който може да се използва за отделяне на частици от течност (филтруване), когато се прилага адекватно налягане върху неговата повърхност. Както е показано на фигура 4, по време на процеса на разделяне на **захранващия поток**- вода (*feed*), тя се изпомпва през мембраната, което позволява на някои съставни компоненти да преминат през мембраната, докато други все още остават в потока, който е известен като **отпадъчен поток** (*waste steam*), **концентриран** или **задържащ нежеланите компоненти поток** (*concentrate or retentate*). Потокът, който съдържа пропускливите (желани) компоненти, е известен като **продуктов поток** (*product stream*) или наричан още **пермеат** (*permeate*), който е относително чист и несъдържащ нежелани компоненти.



Фиг.6 Схематично представяне на разделяне на компоненти чрез мембранен процес (ляво); Частично разделяне на компоненти чрез мембрана (дясно).

5.2 Приложение на мембранната филтрация

Мембранната филтрация има много широко разпространение в областта на екологичната и индустриалната обработка, включително:

- а) Обезсоляване на морска вода за производство на питейна вода;
- б) Регенериране на вода за повторна употреба за производство на питейна вода;
- в) Пречистване на питейната вода чрез отстраняване на патогени и замърсители;
- г) Обработка на битови отпадни води и промишлени отпадни води;
- д) Повторна употреба на отпадъчни води за други отрасли;
- е) Възстановяване на ценни материали от промишлени отпадъчни води.

5.3 Класификация на мембраните според размера на порите им и работното налягане

Четири типа мембрани се използват основно за пречистване на води и отпадъчни води: микрофилтрационни мембрани (**MF**), ултрафилтрационни мембрани (**UF**), нанофилтрационни мембрани (**NF**) и мембрани за обратна осмоза (**RO**). Тази класификация се основава главно на размера на порите на мембраната. Съществуват много критерии за класификация на мембраните.

Според различни работни налягания, мембраните могат да бъдат разделени на мембрани за ниско налягане и мембрани за високо налягане. Докато **NF** и **RO** са мембрани с високо налягане, **MF** и **UF** са мембрани с ниско работно налягане под 5 бара.

Таблица 1 показва общ преглед на различните типове мембрани и техните особености и приложения.

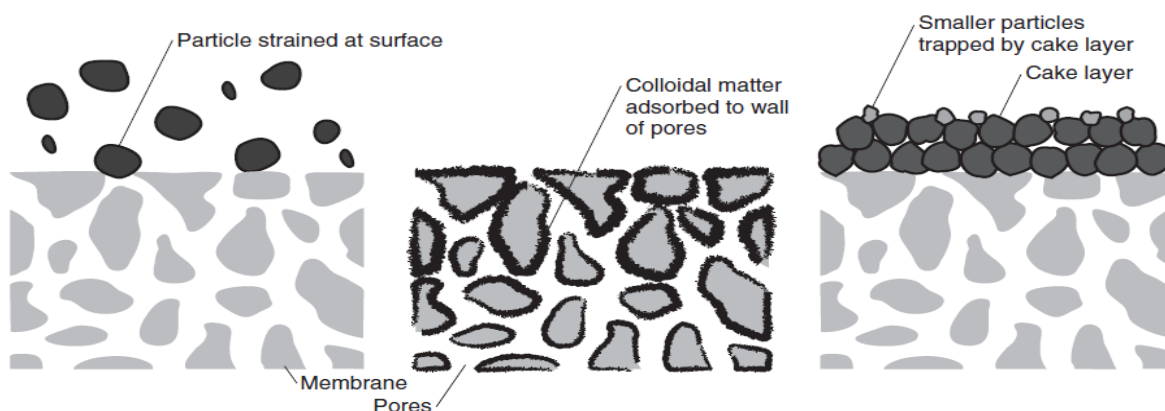
Вид мембрана	Работно налягане [bar]	Размер на порите	Филтриращ механизъм	Механизъм за транспортиране	Премахва компоненти
MF	1-2	0.05-10 μm	Пресяване	Конвекция	Частици, утайки, водорасли, бактерии
UF	2-5	0.001-0.05 μm	Пресяване	Конвекция	Малки колоидни частици, вируси
NF	5-15	< 2.0 nm	Дифузия	Дифузия	Разтворена органична

					материя, двувалентни йони (Ca^{2+} , Mg^{2+})
RO	15-100	~ 0.6 nm	Дифузия	Дифузия	Едновалентни йони (Na^+ , Cl^-)

Таблица 1. Класификация на мембранните процеси.

5.4 Характеристики на мембрана

Както и другите филтрационни процеси MF и UF отделят частици от течната фаза, които могат да преминат през пореста среда. Подобно на конвенционалното филтруване, върху повърхността на мембраната може да се образува утайка от твърди частици поради претоварване по време на филтрацията, както е показано на фигура 7. Този слой от утайка може да се разглежда като "динамична" мембрана, която позволява само по-малки частици да преминават през него, което води до намаляващ поток или увеличаване на **транс-мембранното налягане (TMP)**.



Фиг.7 Запушване на мембранни пори с утаени частици (ляво), колоидни вещества, абсорбирани в порите на стените (център), слой от „динамична“ утайка, който позволява преминаването само на по-малки частици (дясно) ^[8].

Някои частици, напр. **естествените органични вещества (NOM)** не само се натрупват по повърхността на мембраната, но те могат да отидат и по-дълбоко в мембраната и след това да се адсорбират до стените на порите, както е показано в средата на Фигура 7. Този процес е известен като замърсяване, което също може да бъде причинено от блокиране на порите и образуване на утайка. Тъй като части от порестата област са блокирани и някои пори стават по-малки поради адсорбцията, хидравличното съпротивление, което е обратно пропорционално с ефективните пори, се увеличава значително. С други думи, движещото

налягане, което принуждава течността да преминава през мембраната трябва да се увеличи или потокът през мембраната да се отклони.

Голям брой проучвания ^[9-12] показват, че срязващото напрежение на стента е много важен параметър, който може да се използва за индикация на ефективността на мембраната. Известно е, че частиците, натрупани по повърхността на мембраната, ще бъдат отмити, когато напрежението на срязване се увеличи, тъй като може да увеличи обратния транспорт на частиците далеч от мембраната. По-ранно изследване на връзката между замърсяването на мембраната и съотношението между потока на пермеата и напрежението при срязване на стента е изследвано от LeBerge и Daufin през 1996 г. ^[9]. То показва, че съотношението между потока на пермеата и напрежението при срязване на стената може да бъде полезен параметър за прогнозиране на производителността на мембраната при различни работни условия.

В по-късни проучвания ^[10-14], ефектът на срязващото напрежение на стената върху замърсяването на мембраната по време на мембранното филтруване се изследва чрез цифрова симулация, като се използва CFD ^[10-13] или се изследва експериментално ^[14]. Всички тези изследвания показват, че повърхностното напрежение на срязване може да се използва като полезен параметър за индикация на ефективността на мембраната.

5.5 Режими на работа на мембрана

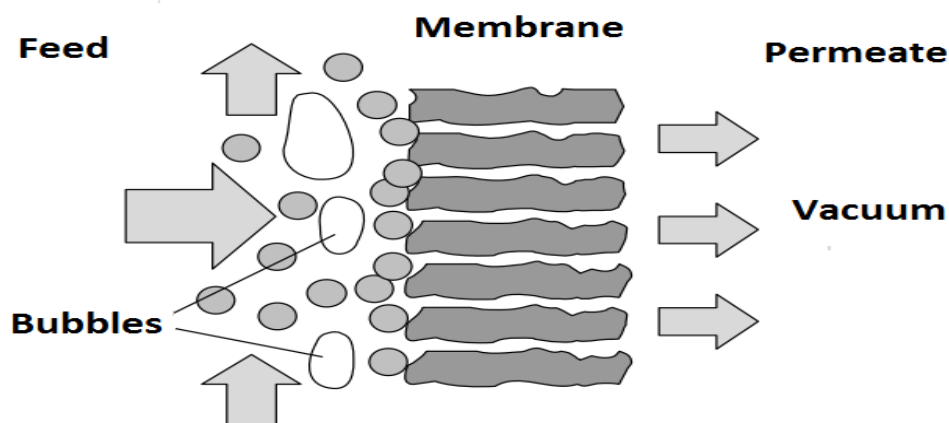
Основен проблем, който ограничава приложението на мембраната, е ефектът от замърсяване на мембраната и образуване на утайка. За да се сведе до минимум този негативен ефект, трябва да се избере подходящ режим на работа.

Три режима на работа на мембраната се използват главно при пречистването на вода и пречистване на отпадъчни води: **режим на непрекъснато филтруване "Dead-End-Filtration"**, **режим филтриране на кръстосан поток "Cross-Flow-Filtration"** и **режим на потопено филтриране "Submerged-Filtration mode"**.

Режимът на непрекъснато филтруване е най-фундаменталният начин, при който потокът на захранване е нормален за мембраната, което води до голям брой съставки, натрупващи се на повърхността на мембраната и генерирайки слой от твърди вещества, известен като филтърна утайка. Тази филтърна утайка може да действа и като филтърна среда, но също така значително увеличава *TMP*.

При режима на филтруване на кръстосан поток се създава кръстосан (тангенциален) поток, който не позволява образуване на филтърна утайка върху мембраната. За тази цел е необходима голяма скорост за създаване на турбуленция, което означава, че консумацията на енергия при кръстосано филтруване е много по-голяма, отколкото консумацията при непрекъснатото филтруване.

При режима на потопено филтриране **мембрана** (*membrane*) е директно монтирана в резервоара със **захранващата смес** (*feed stream*). **Вакуум** (*vacuum*) се прилага като движеща сила върху вътрешната страна на мембраната, която придвижва **продуктовия поток** (*permeate*), за да премине през филтърната среда на мембраната. Този процес на филтруване е илюстриран на фигура 8. Поради вакуума движещата сила е ограничена и е по-ниска от тази в другите режими на филтриране. В резултат на ограничената движеща сила се налагат ограничения за продуктивния поток и **трансмембранното налягане** (*TMP*). Максималното *TMP* в потопената мембранна система е около 0.5 бара^[10], а типичното *TMP* на филтруване с мембранен поток е 0.2 бара^[10]. Освен това, разпръскването на газа се прилага по протежение на повърхността на мембраната, за да се стимулира турбулентността на потока, която контролира и ограничава растежа на филтърната утайка. Трябва да се отбележи, че потопената филтрация често се отнася до кръстосано-поточното филтруване, тъй като потокът на подаване в близост до повърхността на мембраната може да се разглежда като тангенциален поток, предизвикан от **мехурчетата** (*bubbles*) на газа.

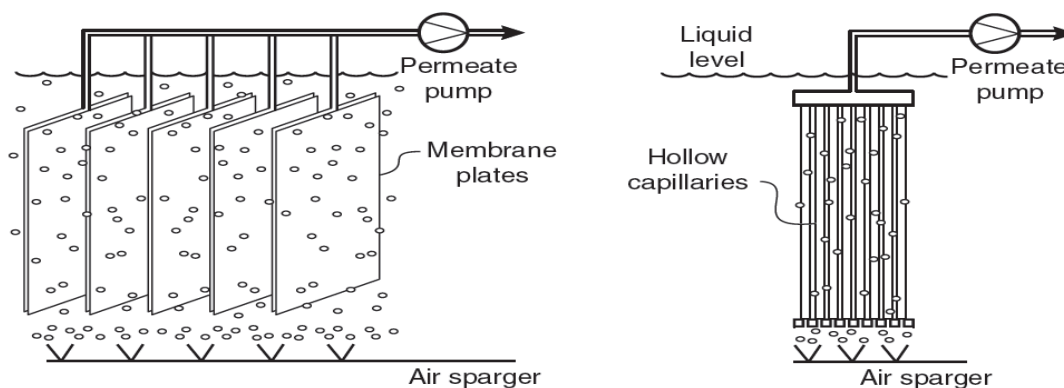


Фиг.8 Схема на режим на потопено филтруване.

5.6 Мембрани модули

Както и другите филтрационни процеси MF и UF отделят частици от течната фаза, които могат да преминат през пореста среда. Подобно на конвенционалното филтриране, върху повърхността на **кухо-влакнеста мембрана** (*Hollow-Fiber membrane*) може да се образува утайка от твърди частици поради натоварване по време на филтрацията, както е показано на фигура 9 дясна страна. Този слой от утайка може да се разглежда като "динамична" мембрана, която позволява само по-малки частици да преминават през него, което води до намаляващ поток или увеличаване на **транс-мембранното налягане** (*TMP*).

Устройството на **панел с плоска мембрана** (*membrane plate panel*), както е показано от лявата страна на фигура 9, се състои от плоски панели с диаметър, вариращ от 0.5-5 mm^[15] и висока плътност на пакетиране. Панелите не са фиксирани на определена позиция, а са подвижни в долния си край, което позволява да бъдат увлечени от захванващия поток, който преминава през порите на мембраната, а чрез вакуумно засмукване се отделя **продуктовия поток** (*permeate*) в горния край на реактора.



Фиг.9 Панели с плоска мембрана (ляво), кухо-влакнеста мембрана (дясно)^[15].

Предимствата и недостатъците на двата вида мембранни модули са изброени в Таблица 2.

Вид мембрана	Предимства	Недостатъци
Кухо-влакнеста мембрана	• Висока способност на пакетиране ($750-1700 \text{ m}^2/\text{m}^3$) • Добра цена • Възможност за по-висока мембрана • Лесна за почистване	• Лесно задръстване с филтърна утайка • Необходимост от често почистване • Лоша циркулация на хранващ поток, поради ламинарния р-м на потока • Приложима при по-ниски концентрации
Панел с плоска мембрана	• Възможност за смяна на всеки панел отделно • По-добра циркулация на хранващия поток, поради турболентност на потока • По-дълго време на работа	• Ниска способност за пакетиране ($>400 \text{ m}^2/\text{m}^3$) • По-голям пад на налягането

Таблица 2. Предимства и недостатъци на панели с плоска мембрана и кухо-влакнеста мембрана.

5.7 Хидродинамични особености на реактор с потопен мембранен модул

Мембранните реактори с аерация от типа барботажни или ерлифтни колони с вграден мембранен модул (най-често с кухи влакна или плоско-паралелен) използват благоприятното влияние на двуфазния поток газ-течност върху срязващите напрежения около мембраната. Издигащите се газови мехурчета при среща с мембранната повърхност влияят в посока на намаляване на концентрационната поляризация и респективно формирането на слой утайка върху нея. Ефектът идва от страна на течната фаза, респективно по-високи действителни скорости до мембраната (свързани с обемната част на течната фаза в реактора, $1-\varepsilon_G$) както и на механичното въздействие на мехурите върху мембраната, което отмива слоя отлагания. В литературата съществуват зависимости между пермеатния поток и скоростта на двуфазната система и на газовата фаза конкретно. Установено е, че от първостепенно значение за срязващите напрежения на мембранната повърхност е размерът на газовите мехурчета.

Съществуват разработки, които свързват всяко съпротивление на процеса - от формиране на слой върху мембраната, адсорбция върху повърхността ѝ, блокиране на порите - в линейна зависимост от създадените от течната и газовата фаза срязващи напрежения на повърхността ѝ.

Съществен фактор за това, което се случва в близост до мембраната, респ. за поведението на потока през мембраната, е наличието на твърда фаза в реактора. Концентрацията на твърда фаза и разпределението на частиците по размер има съществено влияние върху полето на скоростите и срязващите напрежения до мембраната, наблюдавано в диапазон от 1 до 100 μ m диаметър на частиците. Частици с тези размери търпят процеси на агрегиране или дробене, чиято динамика е все още не достатъчно изследвана област

Оптималното действие на мембранный реактор е свързано с: положението на мембранный модул в реактора; съотношението газ/течност; трансмембранното налягане; създаването на достатъчни срязващи напрежения, които да фаворизират триенето на мембранната повърхност. Връзката на последното с намаляването на съпротивлението около мембраната и повишаването на потока пермеат е потвърдено качествено. Сравнително нови и малко на брой са опитите да се моделира процеса като се отчете

динамиката на връзката между трансмембранното налягане, срязващите напрежения на мембраната и потока през мембраната.

5.8 Приложение и предимства на потопен мембранен модул

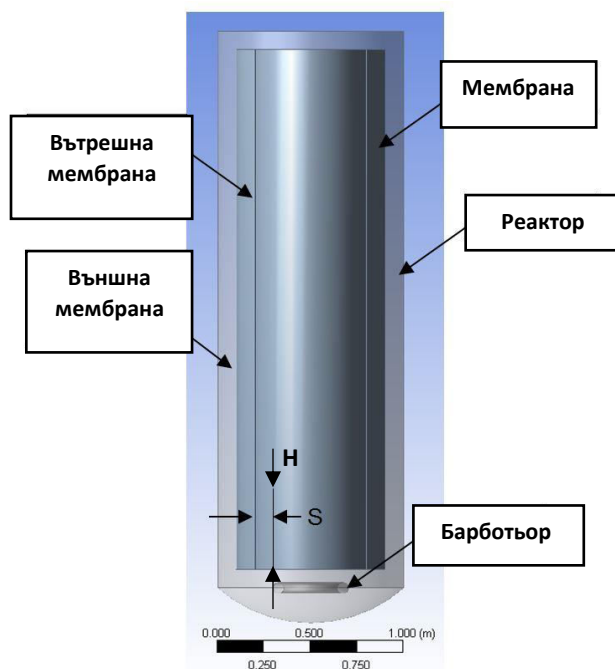
При третиране на битови отпадни води, както и при аеробни процеси, реакторите с потопени вътре в реактора мембрани са особено ефикасни, с изразен ефект на пестене на енергия и пространство. Нещо повече, наличието на газ и сблъсъкът на газовите мехурчета с повърхността на мембраната имат положителен ефект върху намаляването на **утайката** (*fouling*). От гледна точка на подържане на стерилност в цялата система, реакторите с потопена вътре мембрана имат определени предимства. Мембраните, които се използват, са асиметричен тип, т.е. представляващи тънък активен слой с дебелина 0.1 до 0.5 μm и поддържащ слой. Когато мембраната е потопена в реактора, тя трябва да е с активния слой навън и пермеатът се изтегля през нея чрез подналягане, или (по-рядко) чрез свръхналягане в реактора^[16].

II. Експериментална част

1. Описание на изследвания обект

Изследванията в настоящата дипломна работа са проведени върху барботажна колона с потопен мембранен модул показана на фиг.9 със следните геометрични размери: вертикална цилиндрична колона с височина $H=3\text{m}$ и диаметър $D=1\text{m}$.

Барботьорът, разположен в долната част на колоната, има тороидална форма с радиус на пръстена 0.145м и тръбен диаметър 0.120м. и потопена мембрана, разположена на разстояние $S=0.05\text{m}$ от стената на колоната и различна височина $H=0.1, 0.2$ и 0.3m на мембранный модул спрямо барботьора.



Фиг.10 Геометричен модел на барботажна колона с потопен мембранен модул ^[17].

За целите на експеримента е проведена симулация със софтуерен пакет „ANSYS CFX“ версия 19.0 Student edition.

2. Описание на използвания софтуерен продукт

„ANSYS“, основана през 1970г., се развива в световен мащаб на пазара на инженерна симулация. Софтуерът е широко използван от инженери и дизайнери в широк спектър от индустриални задачи.

Компанията се фокусира върху развитието на отворени и гъвкави решения, които дават възможност на потребителите да анализират проекти директно на работния плот. „ANSYS“ предлага цялостен софтуерен пакет, който обхваща голяма гама от физиката, осигуряване на достъп до почти всяка сфера от инженерната симулация. „ANSYS“ инструментите за анализ на известния CFD включват ANSYS Fluent и ANSYS CFX^[18], които се предлагат отделно или заедно в пакета ANSYS CFD^[19].

Основните етапи, през които се преминава при числено изследване посредством CFD са: построяването на математичен модел, дискретизацията му, численото му решаване и интерпретация на получените резултати.

CFD намира все по-широко приложение в различни индустрии, като аерокосмическа, автомобилна, строителство на различни сгради и съоръжения (едни от последните приложения са при моделирането на вятърни турбини и нефтени сонди), химическа, металургия, машино- и уредостроене.

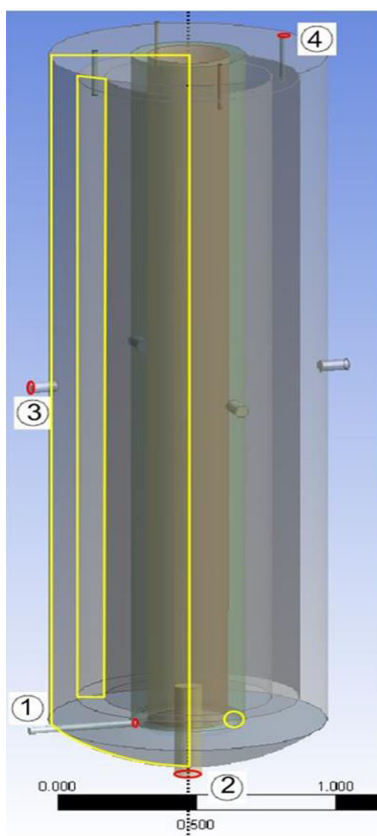
ANSYS CFX^[20] е софтуер с висока производителност. Напредналата технология е ключът към постигането на надеждни и точни решения – бързо и енергетично.

Пълното моделиране на двуфазния поток в средата ANSYS бе извършено съгласно методологията за проверка на геометрията на модела, омрежване на изследвания обект и настройка на променливите описващи физикохимичното поведение на флуида в реактора.

3. Изграждане на геометричен модел на барботажна колона

За изчертаване на барботажна колона в средата на ANSYS Workbench Design Modeler са използвани някои от основните функции:

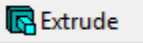
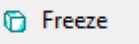
- **Line** – за построяване на линии (означени в жълто на фиг.11)
- **Circle** – за изчертаване на окръжност (областите маркирани в червено 1,2,3 и 4 на фиг.11)



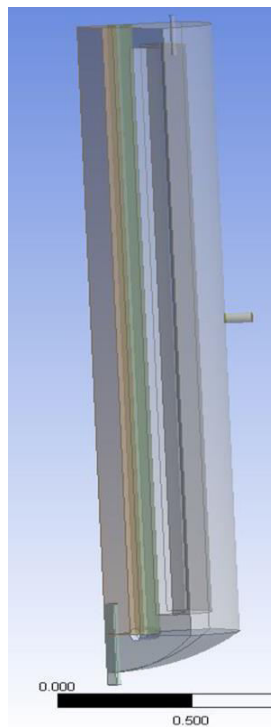
- 1) вход на газа; 2) вход на течността; 3) изход на течната фаза;
4) изход на газа;

Фиг.11 Описание на функции за създаване на 3D модел.

Построяването на 3D геометричния модел се извършва, като се използват вече създадената скица (*Sketch*) и основните функции в среда ANSYS Workbench Design Modeler, описани по-долу.

- Функцията **Extrude** е използвана за изчертаването на външната и вътрешната тръба и барботьора. 
- Функцията **Freeze** е използвана за „замразяване“ на телата, където е необходимо за да се избегне обединяването на тела. 

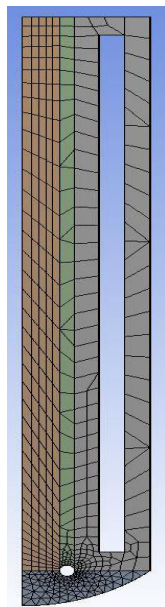
Поради аксиалната симетрия на обекта и работата с обемни елементи се симулира само секторът от 30° на колоната, което намалява времето за изчисление и опростява задачата.



Фиг.12 Изследван сектор от барботажната колона с потопен мембранен модул.

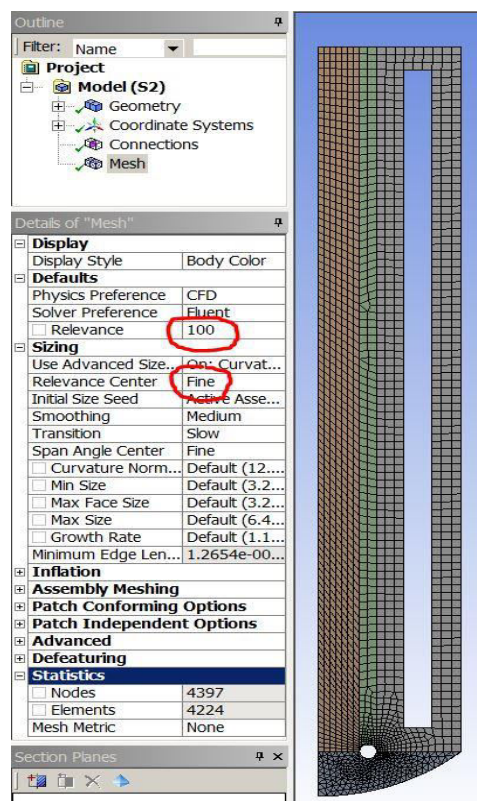
4. Омрежване на изследвания обект

В началото е извършена компютърна симулация на процеса с мрежа (Фиг.13) генерирана автоматично от компютърната система.



Фиг.13 Автоматично генерирана мрежа от компютърната система.

От фиг.13 се вижда, че автоматично генерираната мрежа от компютърната система е много едра за прецизно пресмятане на средното квадратично отклонение между интерациите за налягане и количество на движение. Затова е извършена допълнителна настройка за съгъстяване на мрежата чрез промяна на стойностите на функциите „**Relevance**“ 0 на 100 и „**Relevance center**“ от режим „**course**“ на режим „**fine**“.



Фиг.14 Сгъстяване на мрежа на изследван обект.

5. Условия на експеримента

Тази дипломна работа изследва модел на CFD, който отчита аерирането и конфигурацията на мембрания модул.

Барботажният реактор се модифицира в потопен мембранен барботажен реактор, за да се изследва ефекта от местоположението на потопения мембранен модул върху разпределението на размера на мехурчетата. Включването на мембрания модул увеличава турбуленцията и влияе върху скоростта на срязване по дължина на мембрания модул. Процесът на аериране има тенденция да бъде силно турбулентен, което налага подходящ модел на турбулентност. Моделът за турбулентност k-ε се използва за правилно определяне на скоростта на срязване около стената на мембраната.

Този модел на турбулентност обикновено се използва за моделиране на барботажни колони, тъй като е компромис между изчислителната точност и ефективността ^[17].

Разпределянето на напрежението на срязване върху мембраната също се анализира при различни работни условия, като промяна в положението на мембраната спрямо барботьора и промяна в диаметъра на мехурите. CFD симулациите са в състояние да осигурят ефекта от дизайнерските характеристики върху хидродинамиката на фундаментално ниво, което позволява прогнозиране на ефекта на геометрията и

хидродинамиката на съда върху замърсяването на мембраната, което е от съществено значение за работата на системата.

Начални условия на численото изследване:

- целият изследван обем се заема от течната среда
- скоростта на флуида е нула

6. Параметри на експеримента.

Числените симулации са извършени с промяна на стойностите на следните параметри:

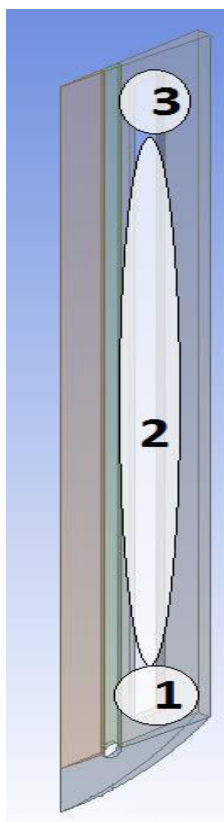
- Различно разположение на мембрания модул по височина спрямо барботьора ($H=0.1\text{m}$, 0.2m и 0.3m).
- За повърхностна скорост на газа 1.5 m/s за диаметри на мехурите на газовата фаза ($D=3$, 6 и 9mm).
- Сравнение между два случая с различна повърхностна скорост на газа 1.5 m/s и 0.5 m/s и еднакъв диаметър на мехурите ($D=3\text{mm}$) и отстояние на мембрания модул по височина спрямо барботьора ($H=0.1\text{m}$).

III. Резултати и дискусия

1. Влияние на положението на мембрания модул върху скоростта на срязване.

Проведени са числени експерименти при различно разстояние на мембрания модул по височина спрямо барботьора, за да се установи влиянието му върху основните хидродинамични параметри на двуфазната система вода-въздух в барботажната колона. Височината H се променя съответно $H=0.1\text{m}$, 0.2m и 0.3m спрямо барботьора.

От получените резултати се изключват двата пика в двата края на мембрания модул (зона 1 и зона 3) за всички разглеждани случаи, показани на фиг. 15. За представителни се приемат резултатите по дължината на мембрания модул, изобразени в зона 2 (*активна зона*) на същата фигура.

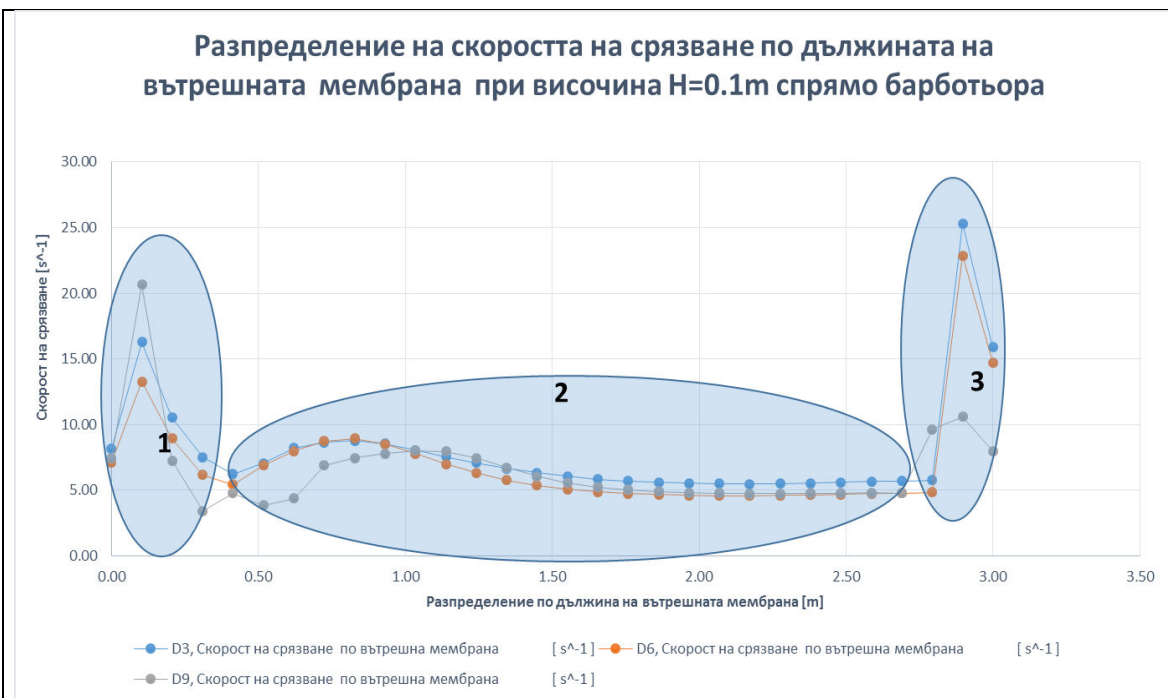


Фиг.15 Описание на зоните на мембраната.

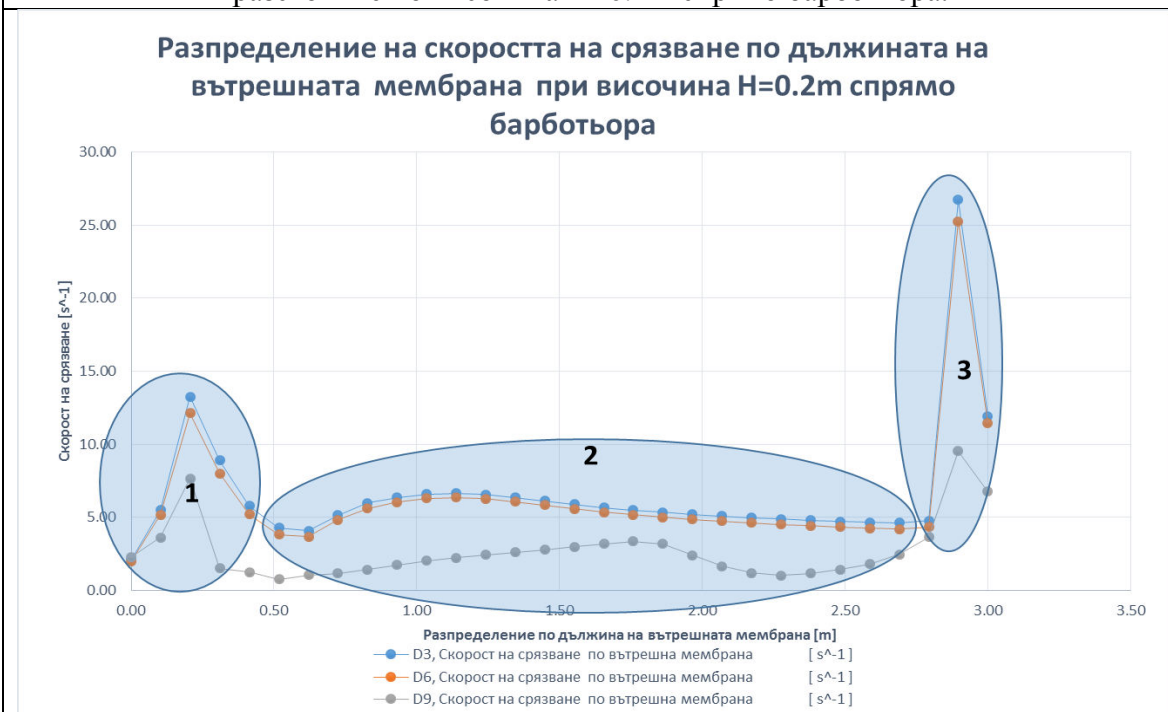
1.1 Влияние върху скоростта на срязване при преместване на мембранный модул по височина спрямо барботьора:

1.1.1 Резултати за вътрешна мембрана при аксиално преместване на мембранный модул ($H=0.1\text{m}$, $H=0.2\text{m}$ и $H=0.3\text{m}$) спрямо барботьора:

На фигури 16, 17 и 18 са представени резултатите за разпределение на скоростта на срязване във всички зони (1,2 и 3) по цялата дължина на вътрешната мембрана при преместване на мембранный модул на разстояние по височина $H=0.1\text{m}$, $H=0.2\text{m}$ и $H=0.3\text{m}$ спрямо барботьора, за мехури с различен диаметър 3мм, 6мм и 9 мм.



Фиг. 16 Разпределение на скоростта на срязване по вътрешната мембрана при разстояние по височина $H=0.1\text{m}$ спрямо барботьора.

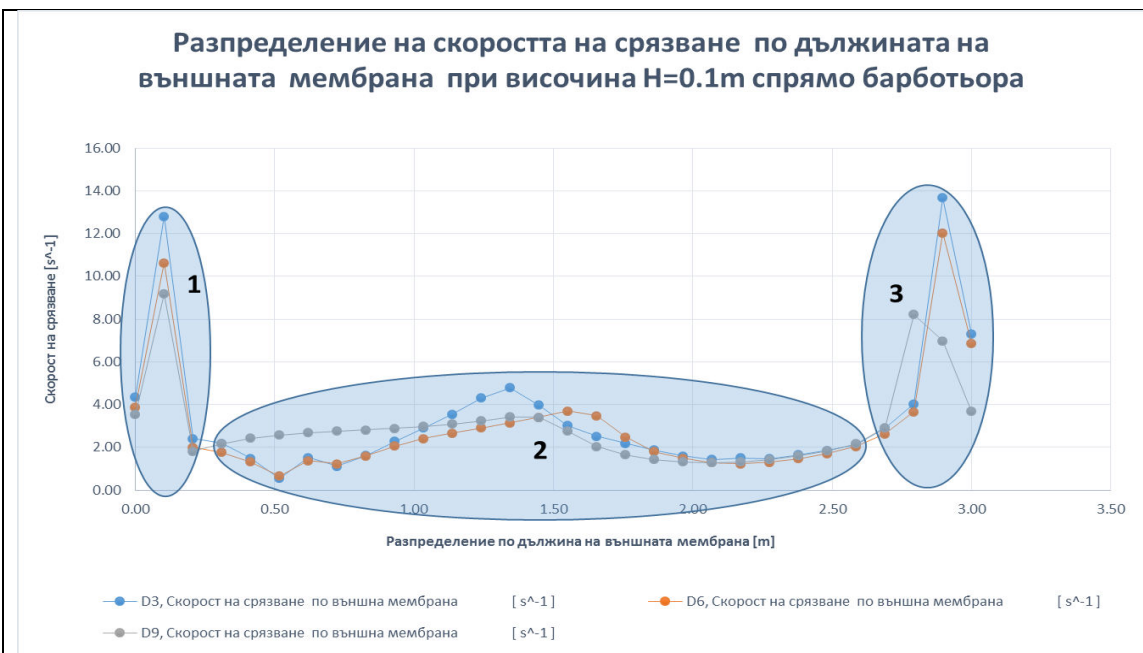


Фиг. 17 Разпределение на скоростта на срязване по вътрешната мембрана при разстояние по височина $H=0.2\text{m}$ спрямо барботьора.

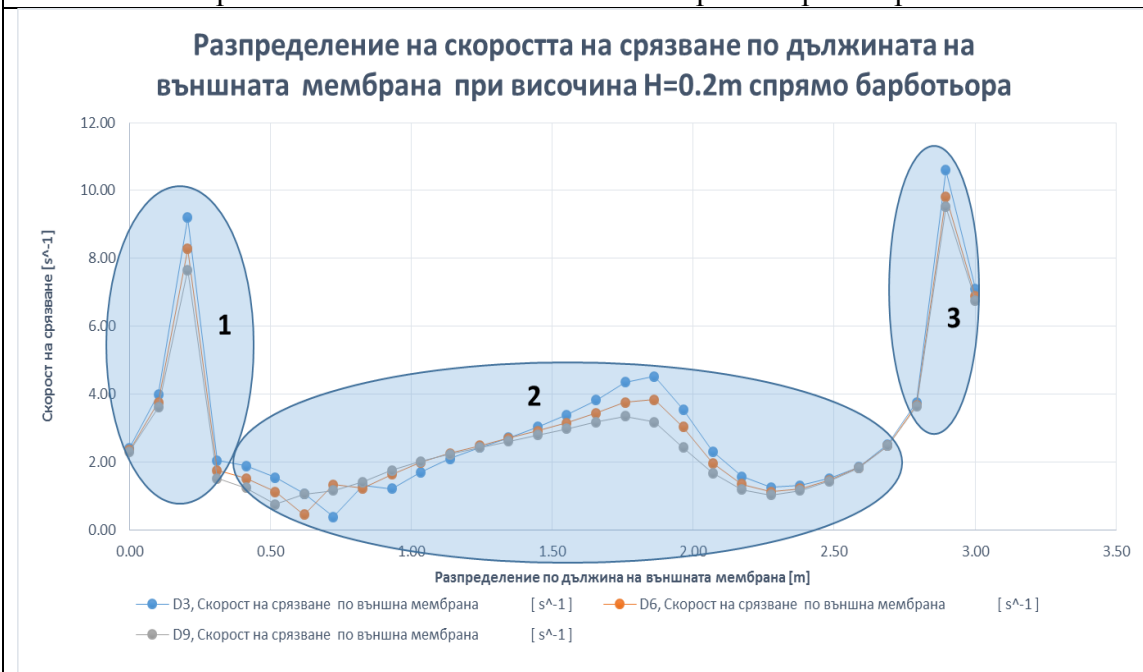


1.1.2 Резултати за външна мембрана при различни стойности на преместване по височина ($H=0.1\text{m}$, $H=0.2\text{m}$ и $H=0.3\text{m}$) на мембрания модул спрямо барботьора:

На фигури 19, 20 и 21 са представени резултатите за разпределение на скоростта на срязване по цялата дължина на външната мембрана при преместване на мембраната по височина спрямо барботьора $H=0.1\text{m}$, $H=0.2\text{m}$ и $H=0.3\text{m}$, за мехури с различен диаметър 3 мм, 6 мм и 9 мм. На фигурите са представени резултати за всички зони (1,2 и 3) на мембраната.



Фиг. 19 Разпределение на скоростта на срязване по външна мембрана при разстояние по височина $H=0.1\text{m}$ спрямо барботьора..



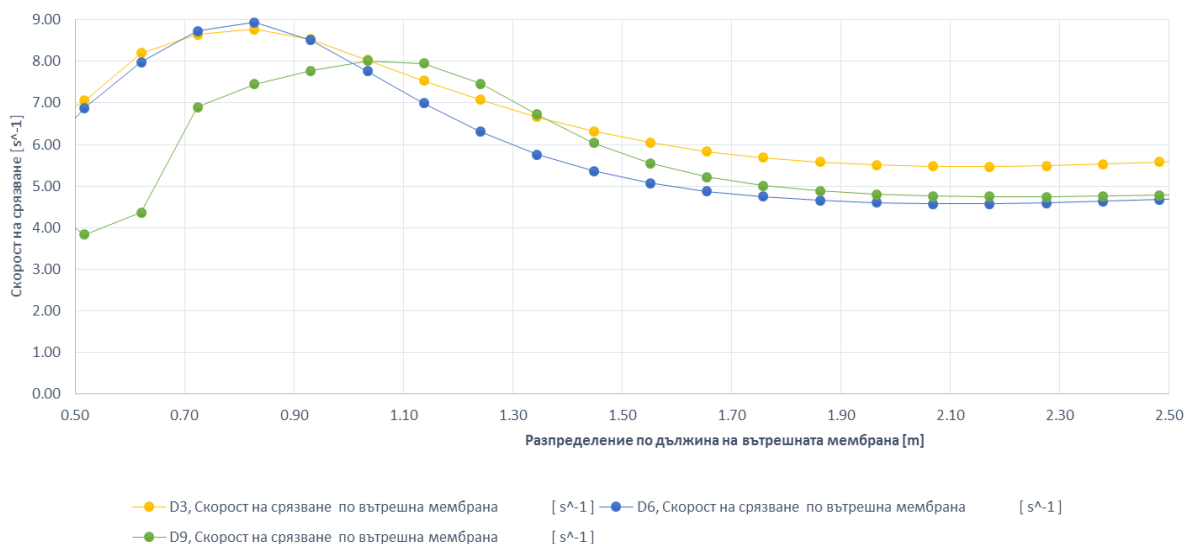
Фиг. 20 Разпределение на скоростта на срязване по външна мембрана при разстояние по височина $H=0.2\text{m}$ спрямо барботьора..



1.1.3 Резултати за разпределение на скоростта на срязване в зона 2 (активна зона) по вътрешната мембрана при преместване на мембрания модул на различна височина спрямо барботьора ($H=0.1\text{m}$, $H=0.2\text{m}$ и $H=0.3\text{m}$):

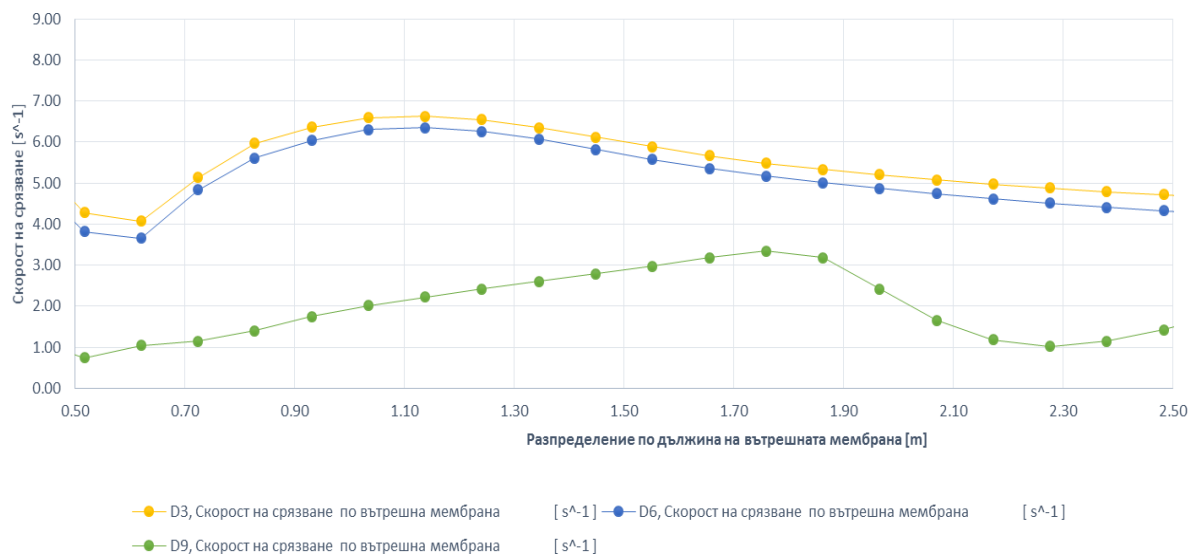
В изследваната област 2 (активна зона) на фигури 22, 23 и 24 се вижда, че скоростта на срязване по вътрешната мембрана е най-висока при височина $H=0.1\text{m}$ спрямо барботьора за диаметър на мехурите 3мм. От всички представени фигури за зона 2 (активната зона) може да се заключи, че по-малкият диаметър на мехурите (3мм и 6мм) влияе положително върху скоростта на срязване.

Разпределение на скоростта на срязване в зона 2 (активна зона) по дължината на вътрешната мембрана при височина $H=0.1\text{m}$ спрямо барботьора

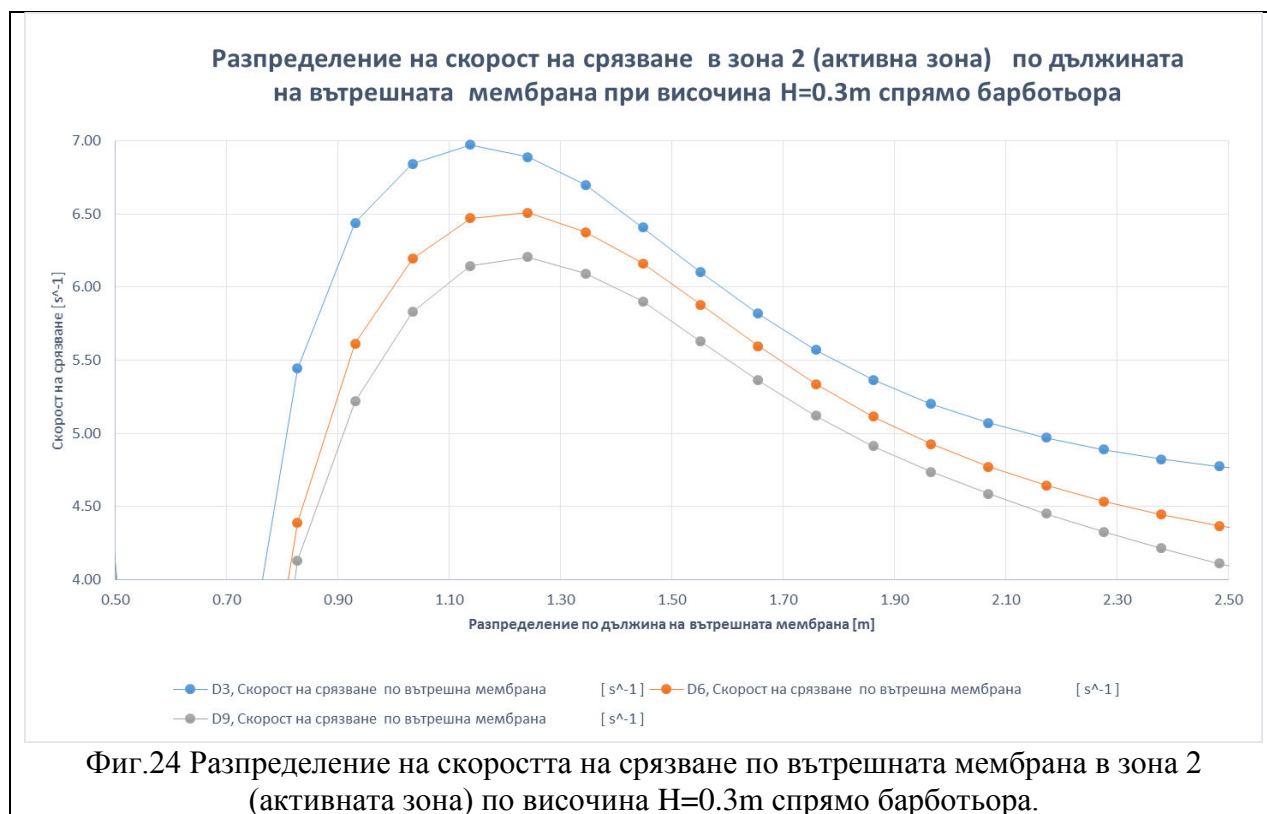


Фиг.22 Разпределение на скоростта на срязване по вътрешната мембрана в зона 2 (активната зона) по височина $H=0.1\text{m}$ спрямо барботьора.

Разпределение на скоростта на срязване в зона 2 (активна зона) по дължината на вътрешната мембрана при височина $H=0.2\text{m}$ спрямо барботьора



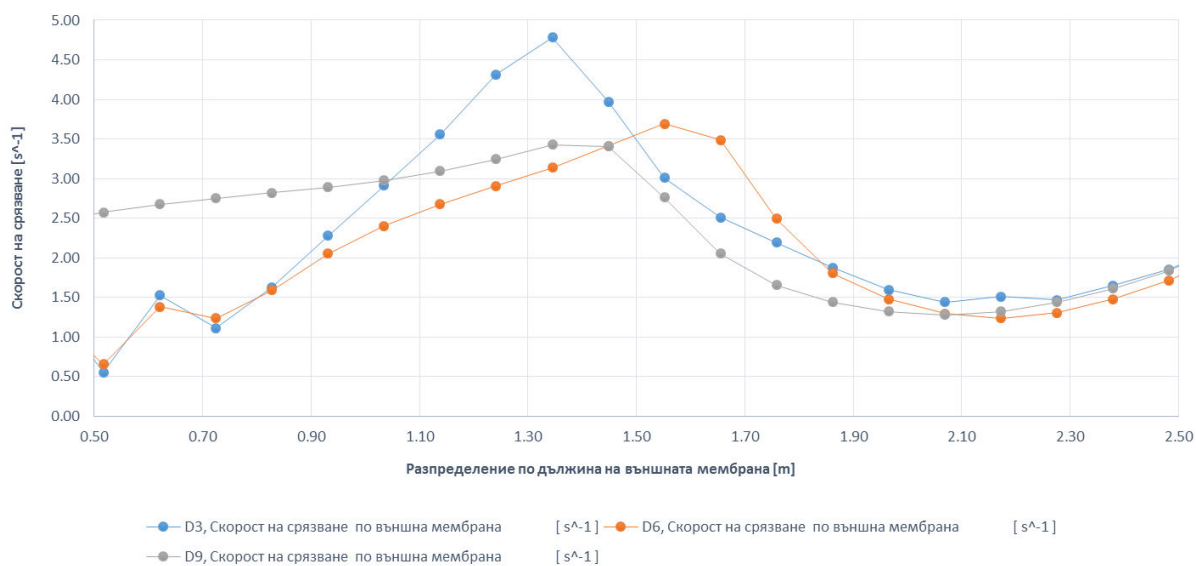
Фиг.23 Разпределение на скоростта на срязване по вътрешната мембрана в зона 2 (активната зона) по височина $H=0.2\text{m}$ спрямо барботьора.



1.1.2 Резултати за разпределение на скоростта на срязване в зона 2 (активна зона) по външната мембрана при преместване на мембрания модул по височина спрямо барботьора ($H=0.1\text{m}$, $H=0.2\text{m}$ и $H=0.3\text{m}$):

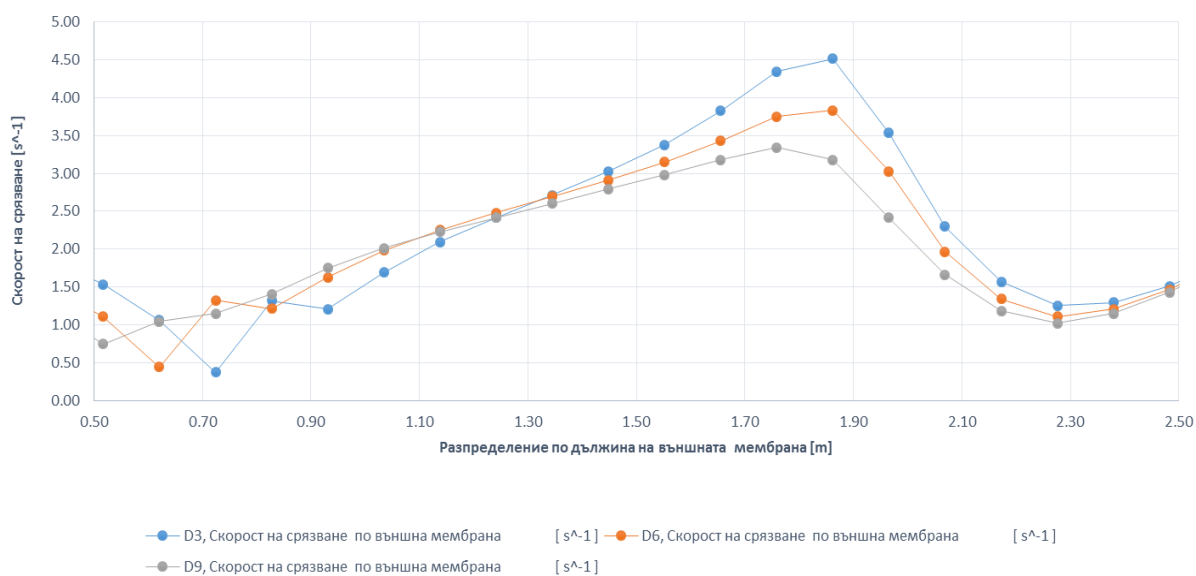
В изследваната област 2 (активна зона) по отношение на външната мембрана на фигури 25, 26 и 27 се вижда, че мехурите с най-голям диаметър-9мм имат най-висока скорост на срязващо напрежение в близост до барботьора, но ефективността им рязко намалява по дължината на мембраната. Мехурите с по-малки диаметри-3мм и 6мм са с по-ниски стойности на срязващото напрежение в близост до барботьора, но са с по-висока ефективност по дължината на мембраната.

Разпределение на скорост на срязване в зона 2 (активна зона) по дължината на външната мембрана при височина $H=0.1\text{m}$ спрямо барботьора

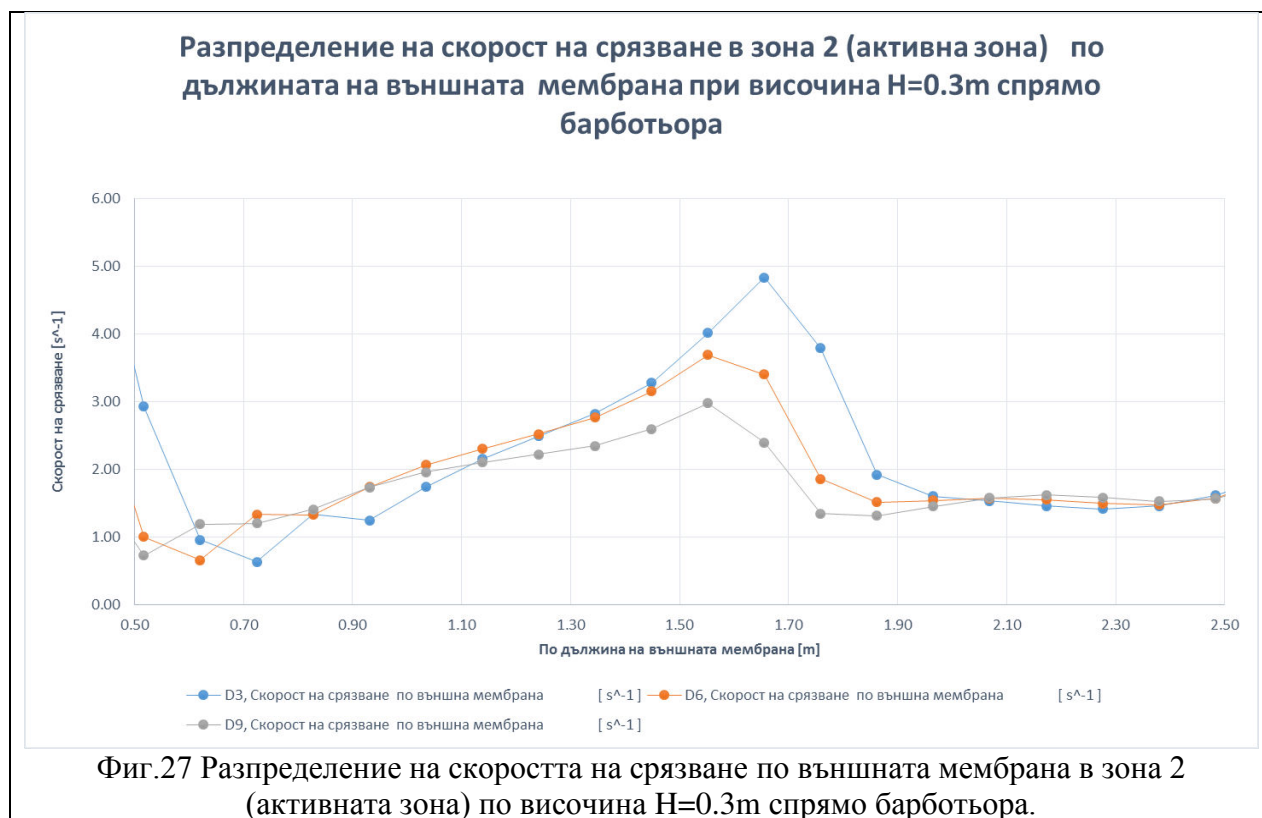


Фиг.25 Разпределение на скоростта на срязване по външната мембрана в зона 2 (активната зона) по височина $H=0.1\text{m}$ спрямо барботьора.

Разпределение на скорост на срязване в зона 2 (активна зона) по дължината на външната мембрана при височина $H=0.2\text{m}$ спрямо барботьора



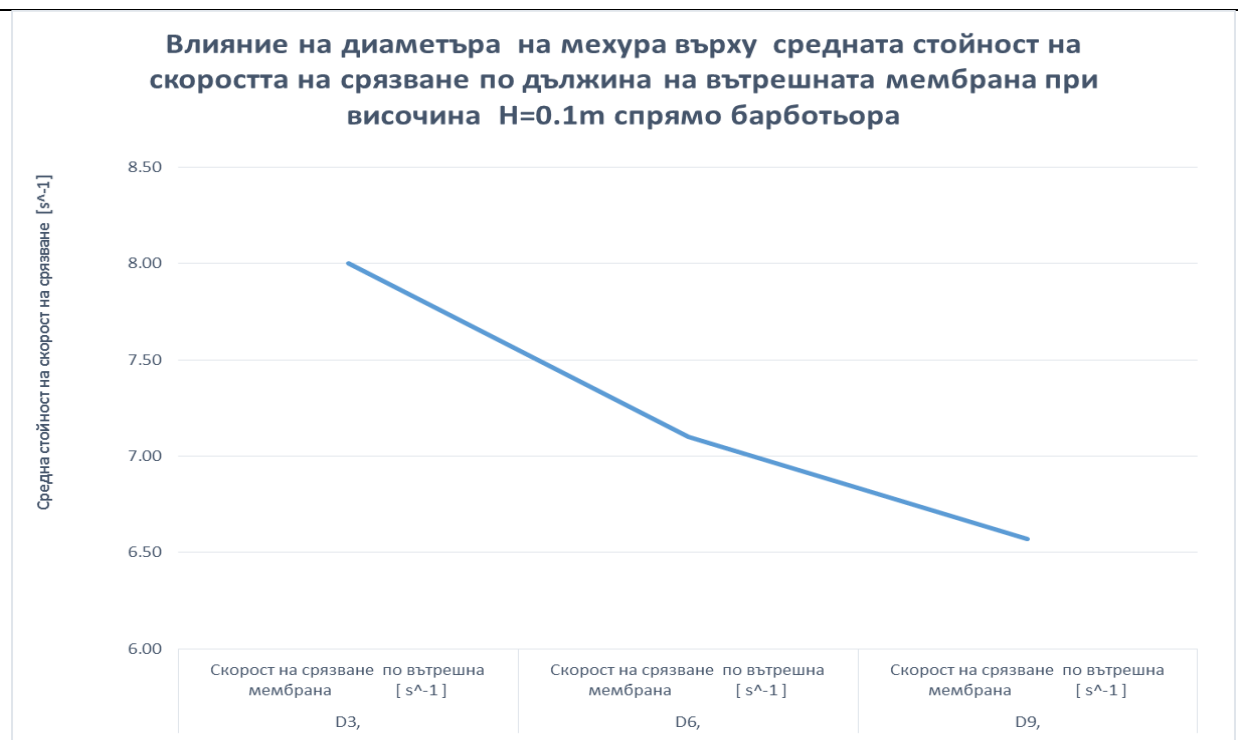
Фиг.26 Разпределение на скоростта на срязване по външната мембрана в зона 2 (активната зона) по височина $H=0.2\text{m}$ спрямо барботьора.



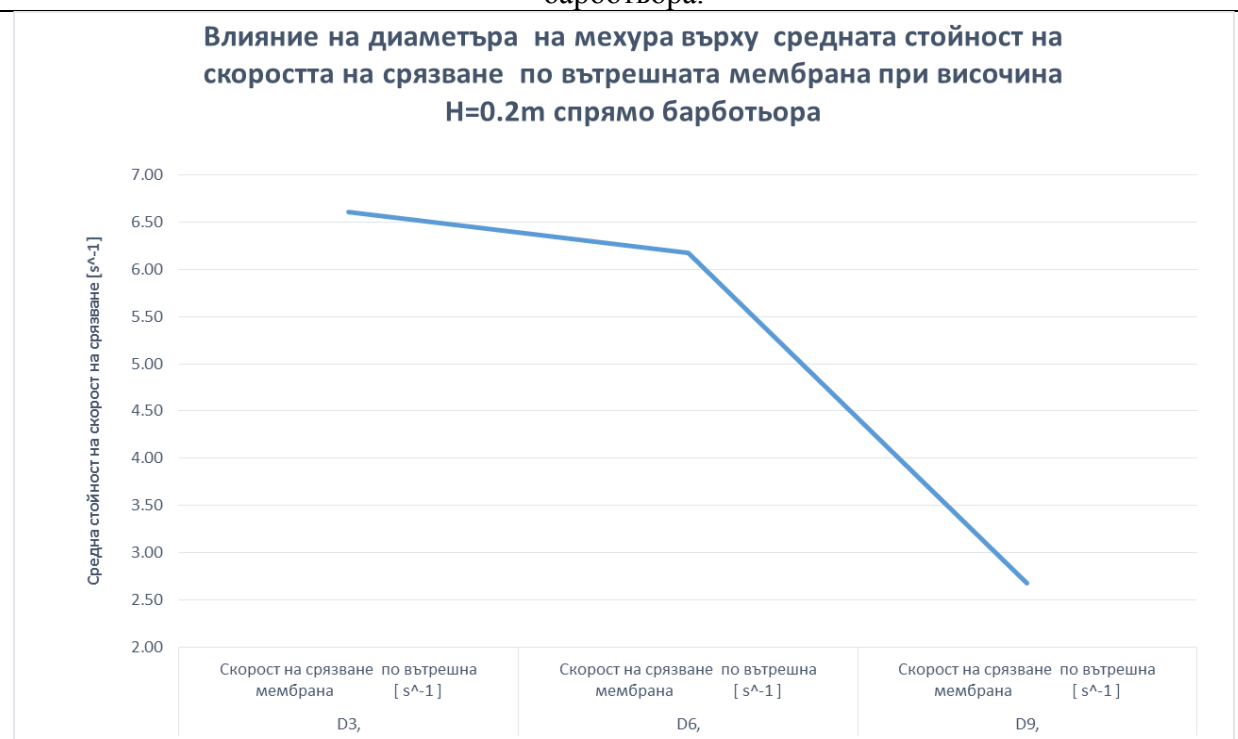
1.2 Влияние на диаметъра на мехурите на газовата фаза върху срязващото напрежение по дължината на мембрания модул

1.2.1 Резултати от влиянието на диаметъра на мехурите ($D=3\text{mm}$, $D=6\text{mm}$ и $D=9\text{mm}$) на газовата фаза върху стойността на скоростта на срязване по дължината на вътрешната мембрана:

Представените резултати на фигури 28,29 и 30 за влиянието на диаметъра на мехурите на газовата фаза върху скоростта на срязване еднозначно затвърждават, че мехурите с по-малък диаметър оказват положително влияние върху скоростта на срязване. Най-високи стойности за скоростта на срязване се наблюдават при най-малкото разстояние по височина на мембрания модул спрямо барботьора за $H=0.1\text{m}$. Стойностите на срязващото напрежение намаляват с отдалечаване на мембрания модул по височина спрямо барботьора за всички изследвани диаметри на мехурите ($D=3\text{mm}$, 6mm и 9mm).



Фиг.28 Влияние на диаметъра на мехурите на газова фаза по дължина на вътрешната мембрана при разстояние по височина на мембрания модул $H=0.1\text{m}$ спрямо барботьора.



Фиг.29 Влияние на диаметъра на мехурите на газова фаза по дължина на вътрешната мембрана при разстояние по височина на мембрания модул $H=0.2\text{m}$ спрямо барботьора.



1.2.2 Резултати от влиянието на диаметъра на мехурите ($D=3\text{mm}$, $D=6\text{mm}$ и $D=9\text{mm}$) върху стойността на скоростта на срязване по дължината на външната мембрана:

Стойностите на скоростта на срязване по дължината на външната мембрана са около 2 пъти по-ниски спрямо стойностите на скоростта на срязване за вътрешната мембрана. Резултатите за външната мембрана са сходни с тези за вътрешната по отношение на влиянието на диаметъра на мехурите върху големината на скоростта на срязване, а именно по-малкия диаметър на мехурите влияе позитивно върху скоростта на срязване по дължината на мембраната. Интресното в случая е, че се наблюдава съвсем малка разлика в стойностите на скоростта на срязване за външната мембрана при различна отдалеченост по височина на мембрания модул спрямо барботьора (фиг.31,32 и 33).



Фиг.31 Влияние на диаметъра на мехурите на газова фаза по дължина на външната мембрана при разстояние по височина на мембрания модул $H=0.1\text{m}$ спрямо барботьора.



Фиг.32 Влияние на диаметъра на мехурите на газова фаза по дължина на външната мембрана при разстояние по височина на мембрания модул $H=0.2\text{m}$ спрямо барботьора.



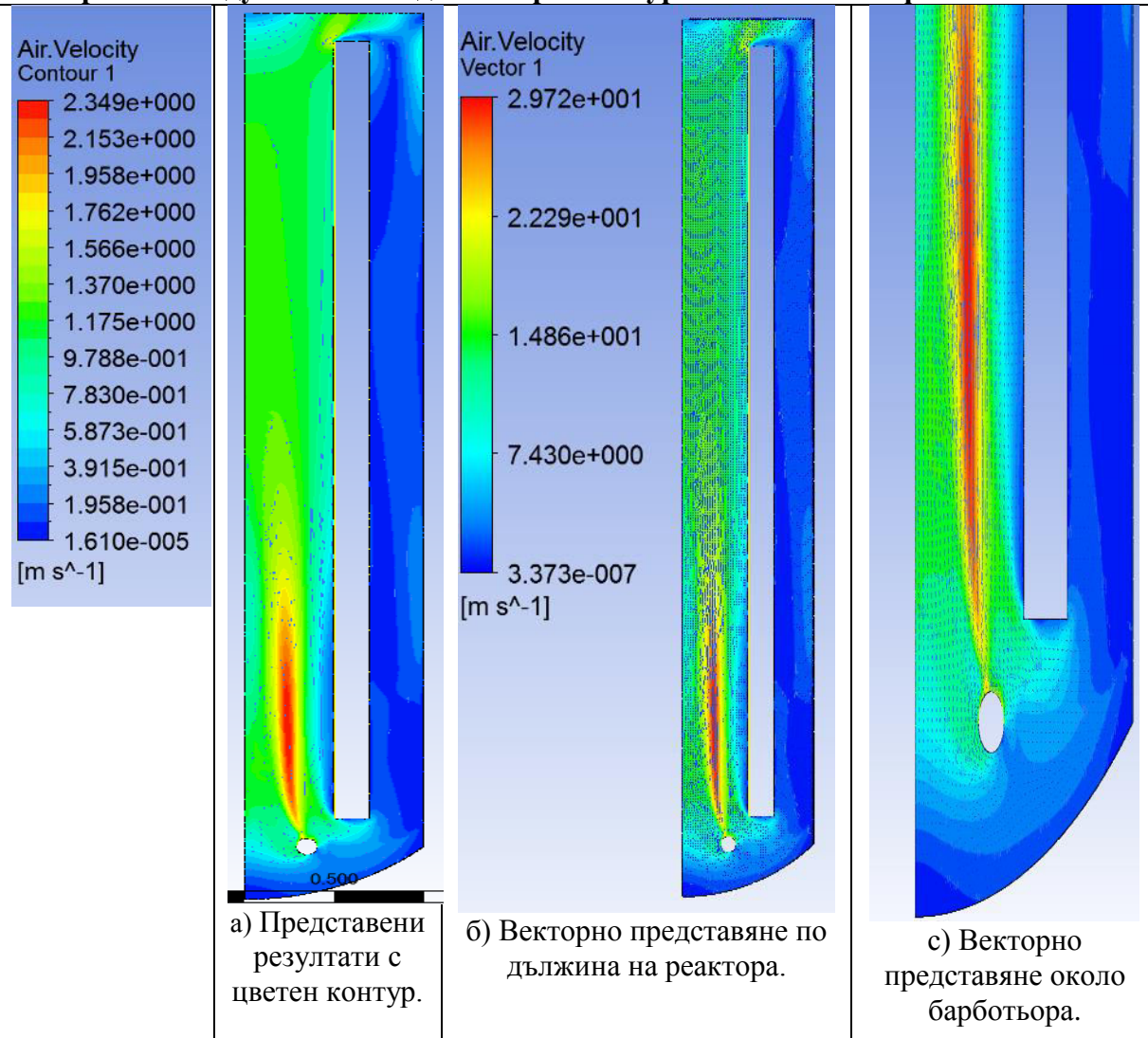
2. Влияние на приведената скорост на газа върху аерацията в барботажна колана с потопен мембранен модул

Аерацията оказва голямо влияние върху скоростта на срязване, чрез увеличаване на степента на аериране се извършва по-интензивна турбулентция вътре в барботажната колона. Освен това аерирането спомага за по-високата ефективност на мембранный модул чрез почистване на мембраните от образувалата се по тях утайка.

2.1 Резултати при приведена скорост на газа 1.5 m/s и различна височина ($H=0.1\text{m}, 0.2\text{m}$ и 0.3m) на мембранный модул спрямо барботьора при мехури с различен диаметър ($D=3\text{mm}, 6\text{mm}$ и 9mm):

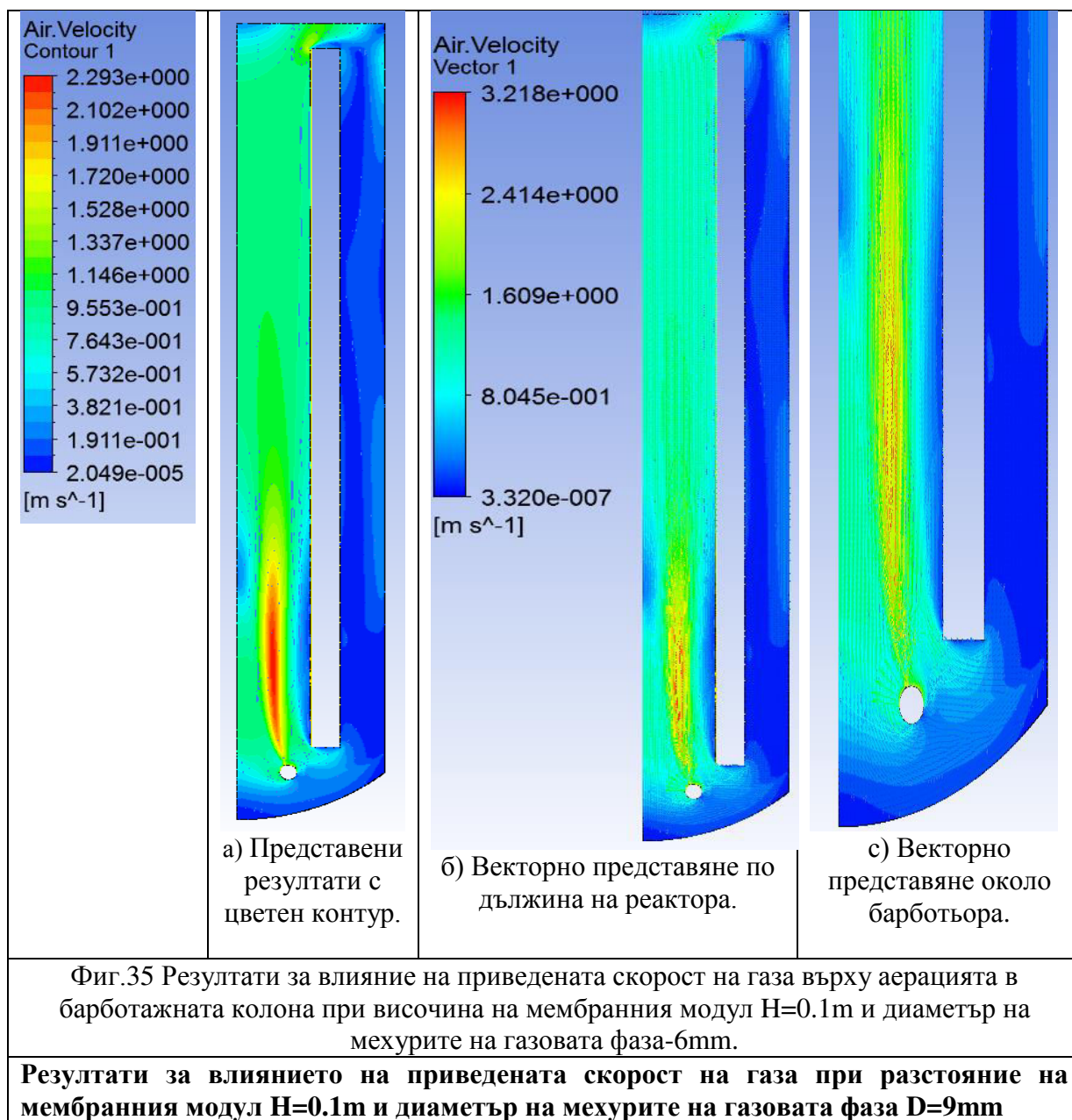
На фигури 34÷42 са представени резултатите за изменение на скоростта на газа по дължина на барботажния реактор с потопена мембрана по два начина: с цветен контур и векторно. Най-висока е скоростта на газа в близост до барботьора, като за всички разглеждани случаи, тя намалява по дължината на реактора. Най-високата достигната скорост на газа е оцветена в червен цвят, а най-ниската в син.

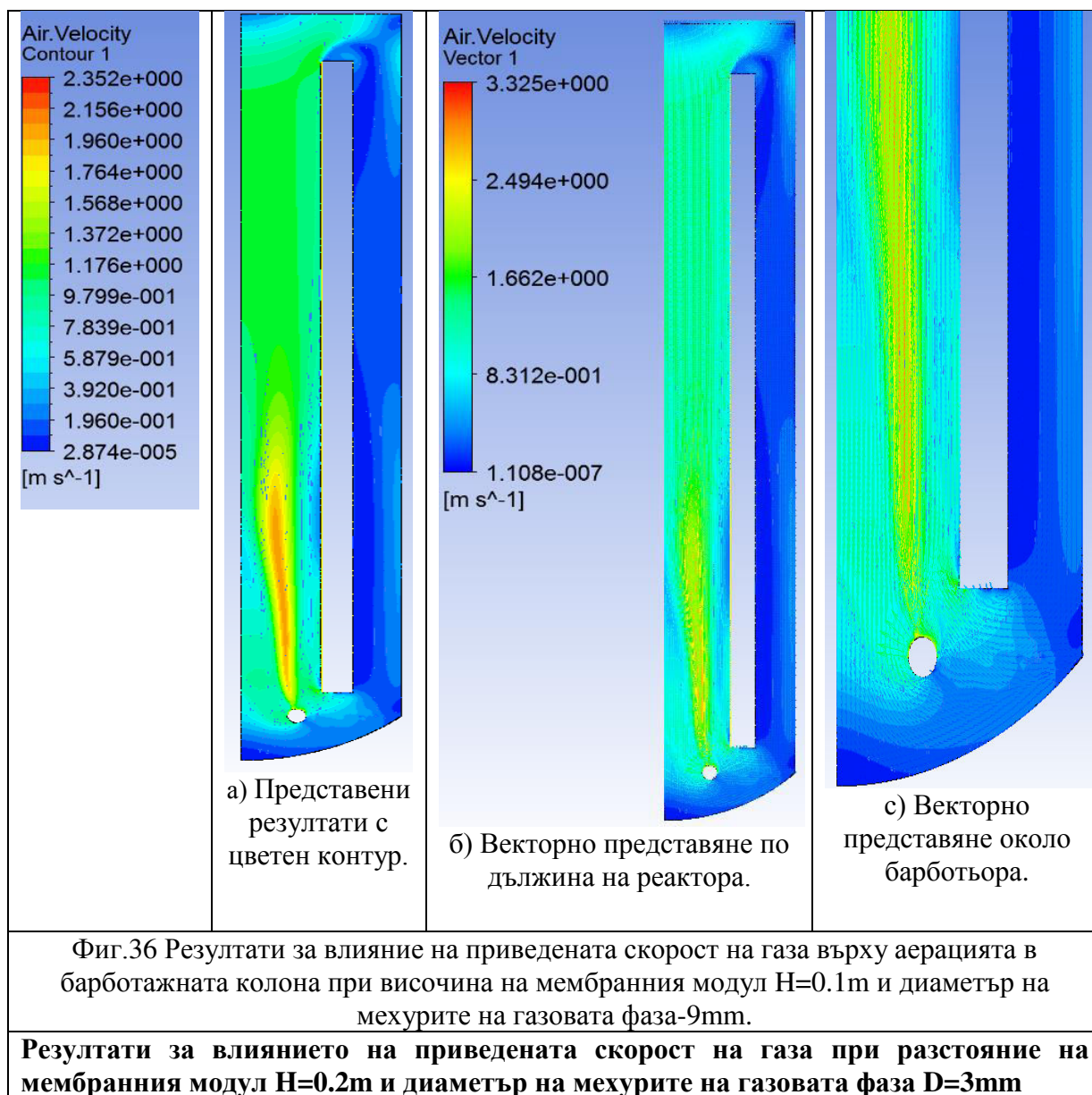
Резултати за влиянието на приведената скорост на газа при разстояние на мембрания модул $H=0.1\text{m}$ и диаметър на мехурите на газовата фаза $D=3\text{mm}$

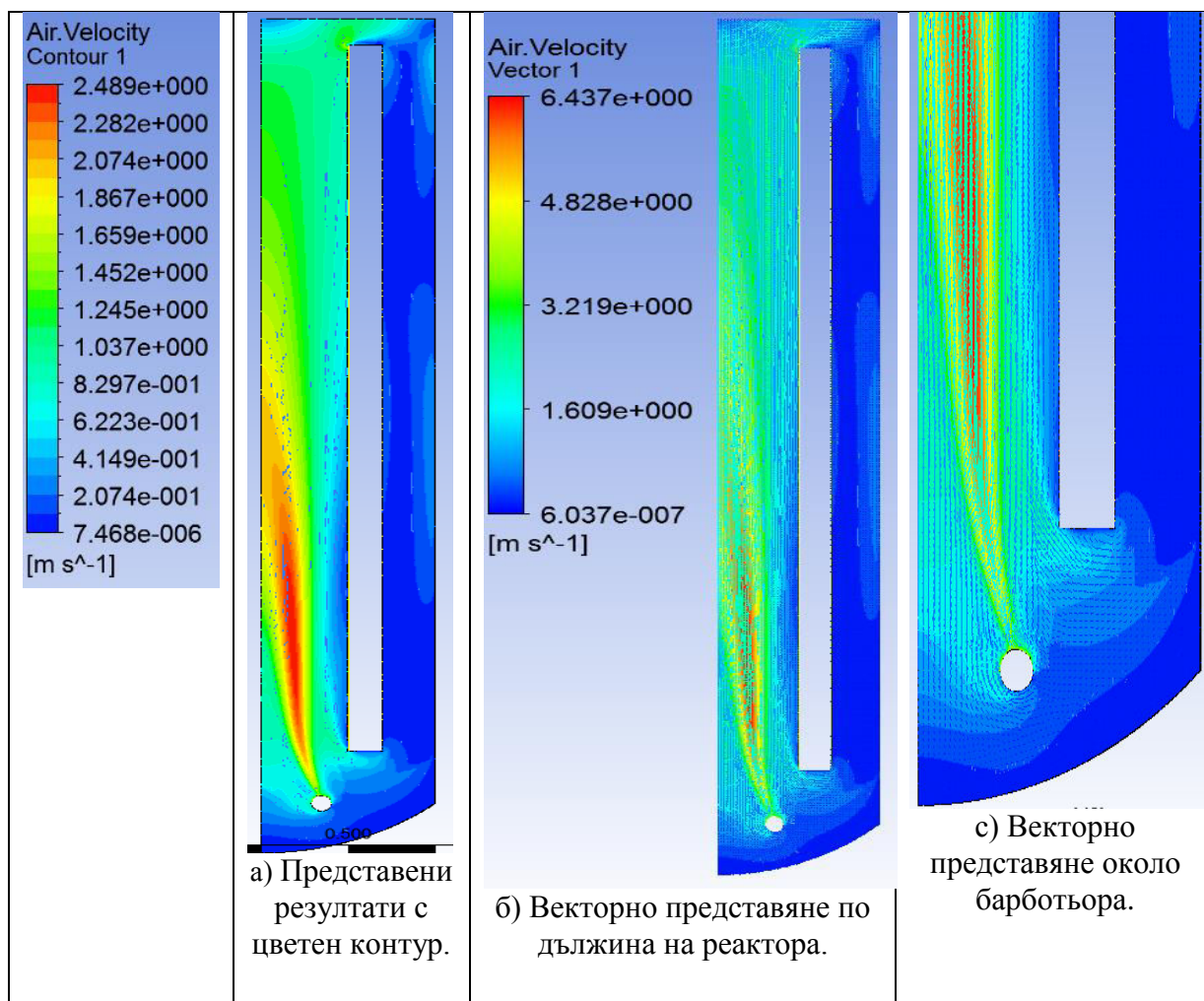


Фиг.34 Резултати за влияние на приведената скорост на газа върху аерацията в барботажната колона при височина на мембрания модул $H=0.1\text{m}$ и диаметър на мехурите на газовата фаза- 3mm .

Резултати за влиянието на приведената скорост на газа при разстояние на мембрания модул $H=0.1\text{m}$ и диаметър на мехурите на газовата фаза $D=6\text{mm}$

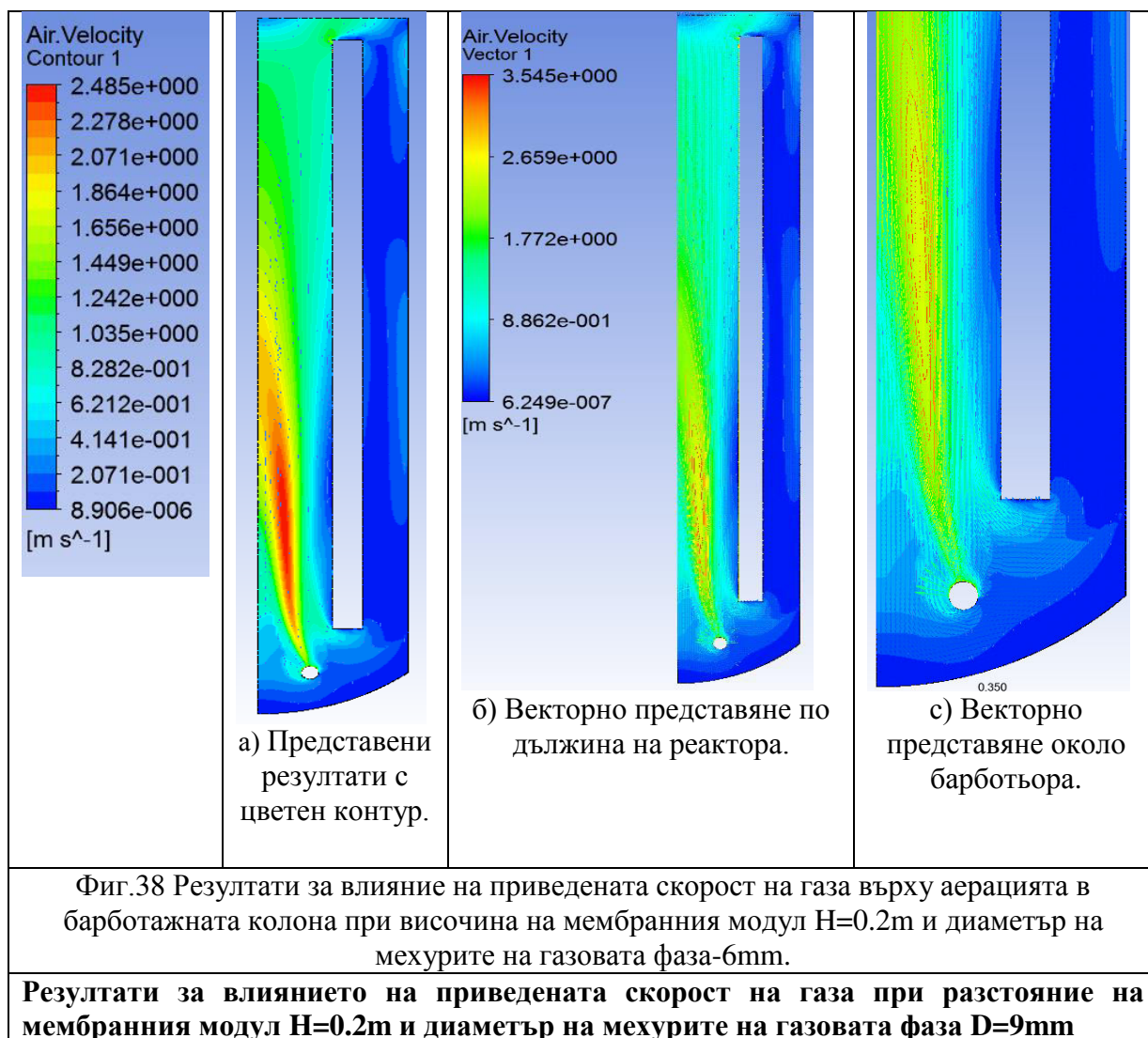


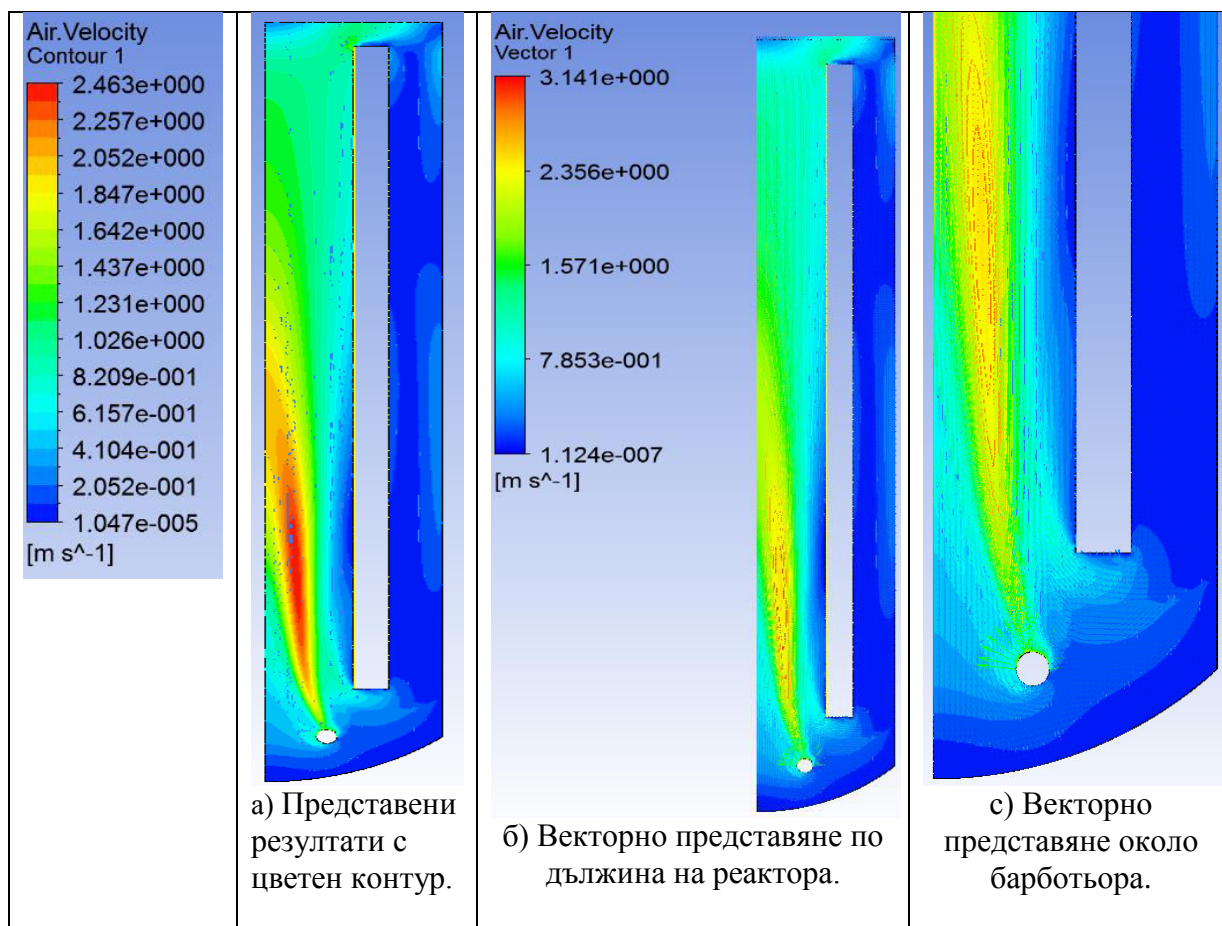




Фиг.37 Резултати за влияние на приведената скорост на газа върху аерацията в барботажната колона при височина на мембрания модул $H=0.2\text{m}$ и диаметър на мехурите на газовата фаза- 3mm .

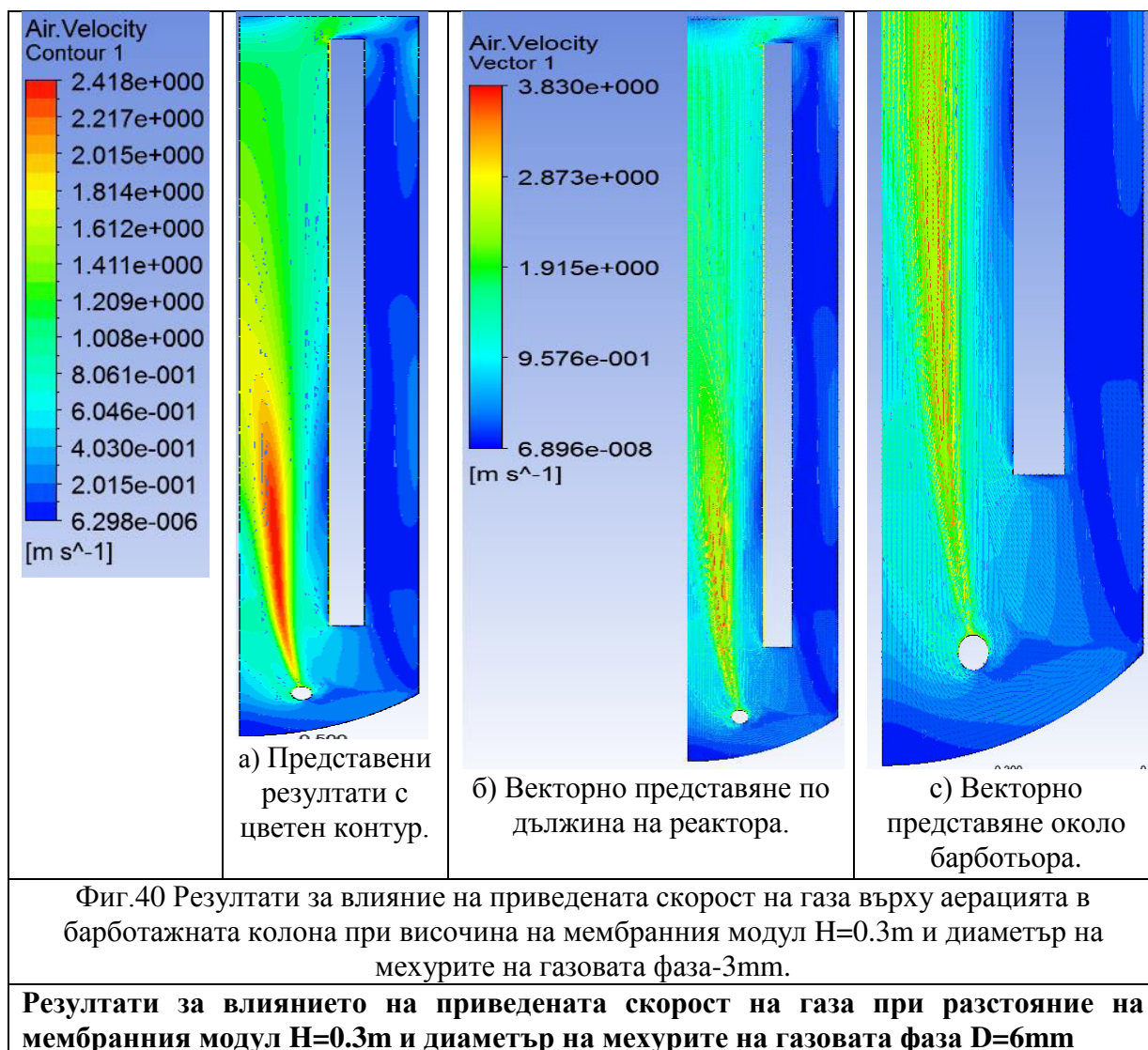
Резултати за влиянието на приведената скорост на газа при разстояние на мембрания модул $H=0.2\text{m}$ и диаметър на мехурите на газовата фаза $D=6\text{mm}$

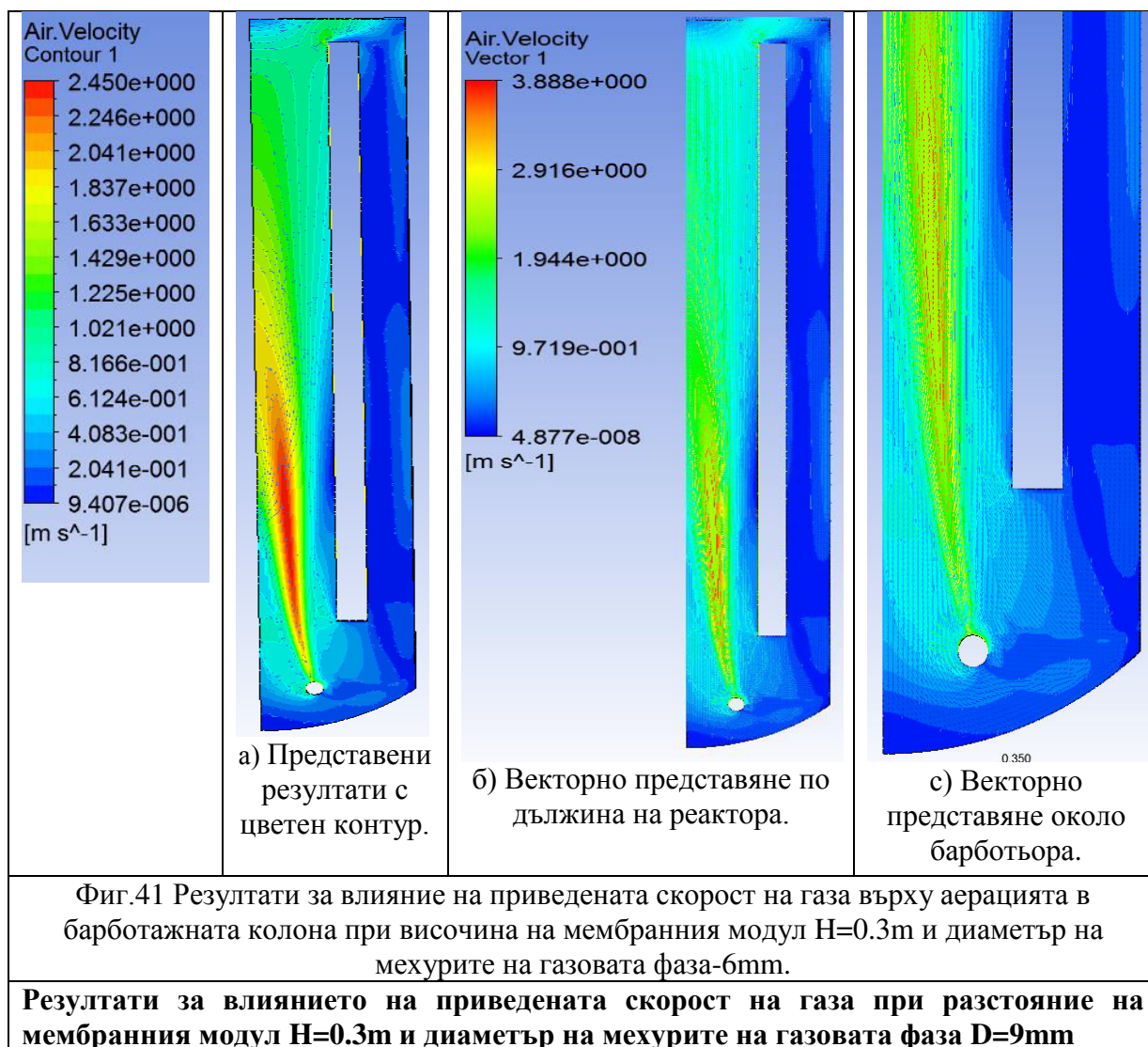


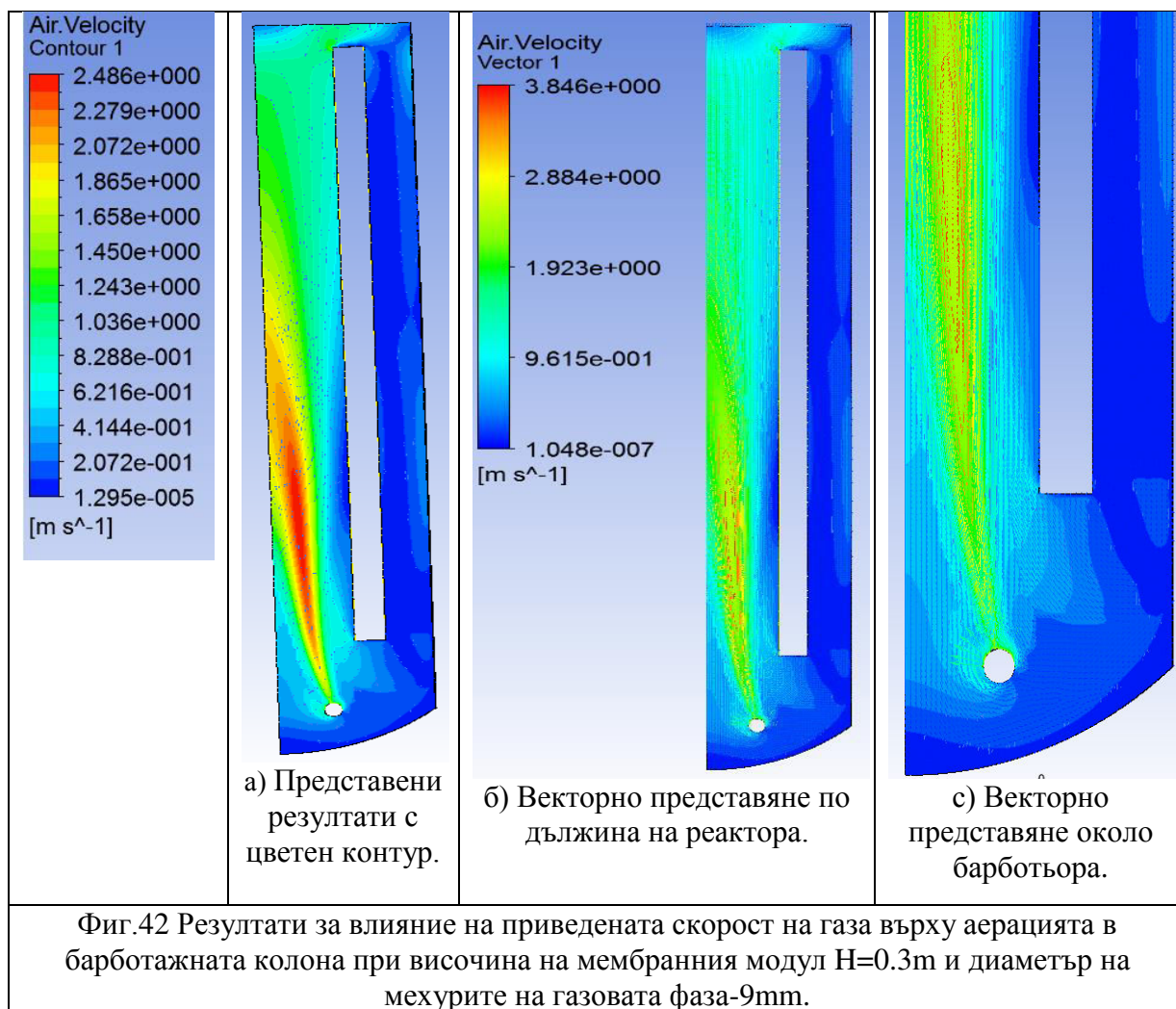


Фиг.39 Резултати за влияние на приведената скорост на газа върху аерацията в барботажната колона при височина на мембрания модул $H=0.2\text{m}$ и диаметър на мехурите на газовата фаза- 9mm .

Резултати за влиянието на приведената скорост на газа при разстояние на мембрания модул $H=0.3\text{m}$ и диаметър на мехурите на газовата фаза $D=3\text{mm}$







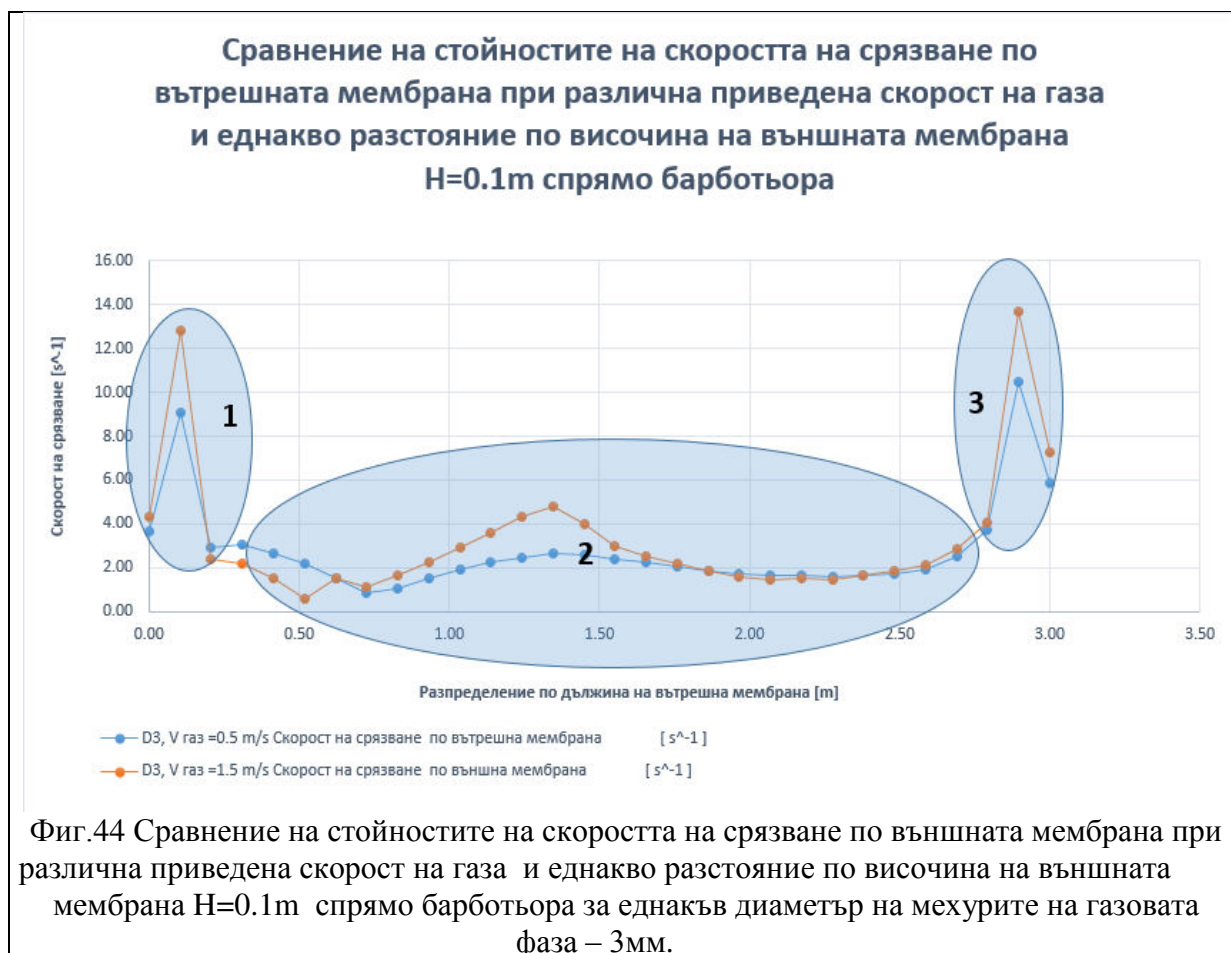
2.2.1 Сравнение на резултати за стойността на скоростта на срязване по вътрешната мембрана при приведена скорост на газа 0.5 m/s и 1.5 m/s на вход на реактора за еднакво отместване по височина на мембрания модул $H=0.1\text{m}$ спрямо барботьора за диаметър на мехурите на газовата фаза 3mm .

На фигура 43 е представено сравнение на стойността на скоростта на срязване по вътрешната мембрана при две приведени скорости на газа 0.5 m/s и 1.5 m/s за еднакъв диаметър на мехурите на газовата фаза - 3mm и еднаква височина на мембрания модул спрямо барботьора $H=0.1\text{m}$. Резултатите от фиг.42 еднозначно показват, че при по-висока приведена скорост на газа, скоростта на срязване по дължина на вътрешната мембрана нараства, докато при по-ниска приведена скорост на газа, скоростта на срязване намалява.



2.2.2 Сравнение на резултати за стойността на скоростта на срязване по външната мембрана при приведена скорост на газа 0.5 m/s и 1.5 m/s на вход на реактора и еднакво отместване по височина на мембрания модул $H=0.1\text{m}$ спрямо барботьора за диаметър на мехурите на газовата фаза 3мм.

Резултатите показани на фиг.44 доказват, че приведената скорост на газа оказва голямо влияние върху стойността на скоростта на срязване. Подобно на резултатите за вътрешната мембрана показани на фиг.43 и тук резултатите при по-висока приведена скорост водят до по-висока скорост на срязване.



2.2.3 Сравнение на стойностите на срязване по вътрешната мембрана в зона 2 (активна зона) при различна приведена скорост на газа и еднаква височина на външната мембрана H=0.1m спрямо барботьора за еднакъв диаметър на мехурите на газовата фаза – 3мм.

На фигура 45 са представени резултатите за стойността на скоростта на срязване в зона 2 (активната зона) за вътрешната мембрана, които показват, че по-високата приведена скорост на газа благоприятства по-високи стойности на скоростта на срязване при еднакви други условия.



Фиг.45 Сравнение на стойностите на скоростта на срязване по вътрешната мембрана при различна приведена скорост на газа и еднакво разстояние по височина на вътрешната мембрана $H=0.1\text{m}$ спрямо барботьора и еднакъв диаметър на мехурите на газовата фаза – 3мм колона при височина на мембрания модул.

2.2.4 Сравнение на стойностите на скоростта на срязване по външната мембрана в зона 2 (активна зона) при различна приведена скорост на газа и еднакво височина на мембрания модул $H=0.1\text{m}$ спрямо барботьора за еднакъв диаметър на мехурите на газовата фаза – 3мм.

На фигура 46 са представени резултатите за стойността на скоростта на срязване в зона 2 (активната зона) за външната мембрана, които показват, че по отношение на външната мембрана различната приведена скорост на газа не води до голямо изменение на скоростта на срязване. Също така стойностите на скоростта на срязване за външната мембрана са по-ниски спрямо тези от вътрешната мембрана.



2.2.5 Влияние на диаметъра на мехура върху скоростта на срязване по вътрешната мембрана при различна приведена скорост на газа, еднакъв диаметър на мехурите на газовата фаза-3мм и отстояние на мембранный модул по височина $H=0.1\text{m}$.

На фиг.47 се вижда, че при еднакви диаметри на мехурите и еднакво отстояние на вътрешната мембрана спрямо барботьора при по-висока приведена скорост на газа имаме по-висока стойност на скоростта на срязване.



Фиг.47 Влияние на диаметра на мехура върху скоростта на срязване по вътрешната мембрана при различна приведена скорост.

2.2.6 Влияние на диаметра на мехура върху скоростта на срязване по външната мембрана при различна приведена скорост на газа, еднакъв диаметър на мехурите на газовата фаза-3мм и отстояние на мембрания модул по височина $H=0.1\text{m}$.

На фиг.48 са представени резултатите за външната мембрана, от които се вижда, че при еднакви диаметри на мехурите и еднаква височина на мембрания модул спрямо барботьора, при по-голяма приведена скорост на газа имаме по-висока скорост на срязване. Въпреки това стойностите на скоростта на срязване по вътрешната мембрана остават по-ниски спрямо тези по външната.



IV. Изводи

След извършване на числените симулации и графичното изобразяване на получените резултатити могат да се направят следните изводи:

1. Аксиалното преместване на мембрания модул спрямо барботьора води до намаляване на скоростта на срязване при еднакви други условия (приведена скорост на газа и диаметър на мехурите). Най-добри резултати са получени при разстояние на мембрания модул по височина спрямо барботьора $H=0.1\text{m}$ и диаметър на мехурите 3mm и приведена скорост на газа 1.5 m/s . Аксиалното преместване на мембрания модул влияе с по-съществено върху скоростта на срязване по вътрешната мембрана и не толкова съществено върху външната.
2. При еднакви други условия диаметърът на мехурите на газовата фаза оказва съществено влияние върху скоростта на срязване. Най-висока скорост на срязващото напрежение е получена при диаметър на мехурите 3mm . Влиянието на

диаметъра на мехура върху стойностите на скоростта на срязване е по-голямо по отношение на вътрешната мембрана.

3. При различни приведени скорости на газовата фаза (0.5 m/s и 1.5 m/s) и еднакви други условия (диаметър на мехурите и разположение по височина на мембрания модул спрямо барботьора), скоростта на срязване нараства при по-високата приведена скорост на газа.
4. Изчислителната динамика на флуидите (CFD) дава възможност за предсказване на това как геометричните характеристики и работните параметри на мембрания реактор като например: позицията на мембранните модули и на дизайна на мембраната; позицията и вида на барботьора, както и на скоростта на аериране биха повлияли на хидродинамиката и на избора на оптималната конструкция и следователно и на производителността на БРПМ.
5. Получените числени резултати, дават възможност за оценка на факторите, които предизвикват замърсяването на мембраната и на ефективността на масопреносните процеси в мембранни реактори с аериране.

V. Използвана литература

- [1]. Deen, N. G., Mudde, R. F., Kuipers, J. A. M., Zehner, P., Kraume, M., 2011, Wiley-VCH. Bubble Columns in Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. 7th edition.
- [2]. Zehner, P., Kraume, M., 2002, Wiley-VCH. Bubble Columns in Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. 6th edition
- [3]. http://www.pse.ice.bas.bg/www_systems_engineering_laboratory/Distance_learning_systemen/g/Distance_Course_15/Lekcii_Course_15/Lekcii_Course_15_PDF/11-%D0%BA%D1%80%D0%B0%D0%B5%D0%BD%20%D0%B2%D0%B0%D1%80%D0%B8%D0%B0%D0%BD%D1%82.pdf
- [4]. Д. Мутафчиева, „Хидродинамични и масообменни изследвания в двуфазни системи“, дисертация, ХТМУ, София, 2014 г.
- [5]. Wild, G., Li, H.Z., Poncin, S., & Olmos, E. (2003), “Some aspects of the hydrodynamics of bubble columns”, International Journal of Chemical Reactor Engineering, Vol. 1, pp. 1-36.
- [6]. Joshi, J.B., Vitankar, V.S., Kulkarni, A.A., Dhotre, M.T., & Ekambara, K. (2002), “Coherent flow structures in bubble column reactors”, Chemical Engineering Science, Vol. 57, pp. 3157-3183.
- [7]. М. С. Ангелов, П. Р. Райнов, Д. П. Стоева, “ВЪЗМОЖНОСТИ ЗА МОДЕЛНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ НА ОБМЕННИТЕ ПРОЦЕСИ В ДВУХОДОВ ТОПЛООБМЕННИК”, УХТ, Пловдив.
- [8]. Borchardt, J.C.C.R.R.T.D.W.H.K.J.H.G.T.J.H., MWH's Water Treatment: Principles and Design, 3rd ed. 2012, Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- [9]. LeBerre, O. and G. Daufin, Skimmilk crossflow microfiltration performance versus permeation flux to wall shear stress ratio. Journal of Membrane Science, 1996. 117(1-2): p. 261-270.
- [10]. Chan, C.C.V., P.R. Berube, and E.R. Hall, Relationship between types of surface shear stress profiles and membrane fouling. Water Research, 2011. 45(19): p. 6403-6416.
- [11]. Kaya, R., et al., Analysis of wall shear stress on the outside-in type hollow fiber membrane modules by CFD simulation. Desalination, 2014. 351: p. 109-119.
- [12]. Chan, C.C.V., P.R. Berube, and E.R. Hall, Shear profiles inside gas sparged submerged hollow fiber membrane modules. Journal of Membrane Science, 2007. 297(1-2): p. 104-120.
- [13]. Abdullah, S.Z., et al., Distribution of surface shear stress for a densely packed submerged hollow fiber membrane system. Desalination, 2015. 357: p. 117-120.

- [14]. Wray, H.E., R.C. Andrews, and P.R. Berube, Surface shear stress and membrane fouling when considering natural water matrices. *Desalination*, 2013. 330: p. 22-27.
- [15]. Thomas Merlin, R.R., *Membranverfahren: Grundlagen der Modul-und Auflagenauslegung*. 3rd ed. 2007, Heidelberg: Springer.
- [16]. Цибранска И., Мутафчиева Д., „Биореакторна техника“, София 2018
- [17]. Moutafieva D., Iliev V., “Influence of geometrical and operational parameters on the performance of bubble reactor with imersed membrane module”.
- [18]. Ruzicka, M. C.; Drahos, J.; Fialova, M.; Thomas, N. H., (2001). Effect of bubble column dimensions on flow regime transition. *Chemical Engineering Science*, 56(21-22), 6117-6124.
- [19]. Siegel, M.J., Merchuk, J.C., Schugerl, K., 1986. Airlift reactor analysis: interrelationships between riser, downcomer, and gas-liquid separator behaviour, including gas recirculation effects, *AIChE Journal* 32, 15.
- [20]. van Benthum, W.A.J., van der Lans, R.G.J.M., van Loosdrecht, M.C.M., Heijnen, J.J., (1999). Bubble recirculation regimes in an internal-loop airlift reactor. *Chemical Engineering Science* 54, 3995-4006.

Числените симулации описани в настоящата диплома работа бяха проведени в „Център по математично моделиране и компютърна симулация“ на ХТМУ-София.