

Универзитет у Београду
Машински факултет

Милош М. Ивошевић

**ПРОЦЕСНЕ ПЕРФОРМАНСЕ КОЛОНЕ СА
ИСПУНОМ ПРИ ВАКУУМСКОЈ
ДЕГАЗАЦИЈИ ВОДЕ**

Докторска дисертација

Београд, 2020

University of Belgrade
Faculty of Mechanical Engineering

Miloš M. Ivošević

**PROCESS PERFORMANCES OF PACKED
COLUMN FOR WATER DEGASSING UNDER
VACUUM**

Doctoral dissertation

Belgrade, 2020

Комисија за преглед и одбрану:

Ментор: Проф. др Србислав Генић, дипл. инж. маш.
Машински факултет у Београду

Чланови комисије: Проф. др Иван Аранђеловић, дипл. мат.
Машински факултет у Београду
В. проф. др Мирјана Стаменић, дипл. инж. маш.
Машински факултет у Београду
Доц. др Никола Карличић, дипл. инж. маш.
Машински факултет у Београду
Доц. др Јован Јовановић, дипл. инж. тех.
Технолошко-металуршки факултет у Београду

Датум одбране: _____ 2020. године

ИЗЈАВА ЗАХВАЛНОСТИ

С обзиром на то да ми је при изради ове докторске дисертације велики број људи несебично пружио помоћ и подршку, искористио бих ову прилику да им се захвалим и на тај начин бар делимично одужим.

Најискреније бих се захвалио свом ментору проф. др Србиславу Генићу који ми је од самог почетка својим стрпљењем и саветима улио мотивацију да ову дисертацију успешно завршим.

Посебну захвалност дугујем проф. др Браниславу Јаћимовићу чије су препоруке и сугестије у изузетној мери унапредиле ову дисертацију.

Такође овом приликом бих се захвалио свим колегама односно коауторима радова проистеклих из ове докторске дисертације.

Свом оцу др Милићу Ивошевићу, мајци Богданкић и сестри Уни одајем захвалност на подршци током свих ових година студирања.

Процесне перформансе колоне са испуном при вакуумској дегазацији воде

АПСТРАКТ

Предмет ове докторске дисертације је истраживање процесних параметара вакуумског дегазатора напојне воде са насутом испуном за системе даљинског грејања и формирање оригиналне прорачунске процедуре. У дисертацији је дат преглед прорачунских процедура, доступних у отвореној литератури, које су данас најзаступљеније у практичном инжењерском раду. Показано је да анализирани методологије доводе до поддимензионисања апарата односно до апарата са недовољном висином испуне. На основу резултата експерименталних испитивања на индустријском вакуумском дегазатору, формирана је оригинална корелација за прорачун коефицијента прелаза супстанције у течности предметног типа апарата. Ова процедура, односно корелација, може да се користи за прорачун и димензионисање нових апарата, као и за анализу рада постојећих апарата овог типа.

Кључне речи: Колоне са насутом испуном; коефицијент прелаза супстанције; вакуумска дегазација

Научна област: Машинство

Ужа научна област: Процесна техника

УДК број: 621.182.1:66.069.84(043.3)

Process performances of packed column for water degassing under vacuum

ABSTRACT

The subject of this doctoral dissertation is the research of process parameters of a vacuum degasser with random packing used for water degassing in district heating systems and formation of the original design procedure. The dissertation gives an overview of the calculation procedures available in the open literature, which are the most represented in practical engineering work. It has been shown that the methodologies analyzed could lead to an undersizing of the apparatus i.e. to a insufficient height of the packed bed. Based on the experimental testing of industrial vacuum degasser, an original correlation for calculation of the mass transfer coefficient in a liquid phase of this type of apparatus has been formed. This procedure i.e. correlation, can be used for design and sizing of new equipment, as well as for performance analysis of existing equipment of this type.

Key words: packed columns; mass transfer coefficient; vacuum degassing

Scientific discipline: Mechanical engineering

Scientific subdiscipline: Process engineering

UDK number: 621.182.1:66.069.84(043.3)

Садржај

1	УВОД.....	1
2	ДЕГАЗАЦИЈА И КОРОЗИЈА	1
2.1	Дегазација и појам деоксигенације.....	1
2.2	Корозија.....	2
2.2.1	Трошкови везани за корозију.....	2
2.2.2	Типови корозије и проузрокованих оштећења.....	3
2.2.3	Механизми корозије	6
2.2.4	Корозија проузрокована кисеоником у води.....	6
2.3	Основне методе дегазације напојне воде	8
2.3.1	Вакуумска дегазација воде.....	8
2.3.2	Типови вакуумских дегазатора.....	9
3	ОПИС ПОСТРОЈЕЊА ЗА ВАКУУМСКУ ДЕГАЗАЦИЈУ	11
4	ПРЕГЛЕД ЛИТЕРАТУРНИХ ИЗВОРА.....	16
4.1	Интензитет транспорта супстанције у колонама са комадном испуном према [19]	17
4.1.1	Коефицијент прелаза супстанције у течности.....	17
4.1.2	Коефицијент прелаза супстанције у гасу.....	17
4.1.3	Интензитет квашења испуне	18
4.2	Коефицијент прелаза супстанције у колонама са испуном према [20].....	20
4.2.1	Коефицијент прелаза супстанције у течности.....	20
4.2.2	Коефицијент прелаза супстанције у гасу.....	24
4.2.3	Интензитет квашења испуне	24
5	ТОПЛОТНЕ ПЕРФОРМАНСЕ РЕКУПЕРАТОРА ТОПЛОТЕ ПОСТРОЈЕЊА ЗА ДЕГАЗАЦИЈУ ПРЕМА [24].....	28
5.1	Номенклатура бајонетних размењивача топлоте према [24]	28
5.2	Моделирање бајонетних размењивача топлоте према [24].....	29
5.2.1	Методологија мерење топлотних перформанси и запрљања плочастог загрејача улазне воде PRT-103 према [22]	35
6	МОДЕЛИРАЊЕ ТРАНСПОРТА СУПСТАНЦИЈЕ У ВАКУУМСКИМ ДЕГАЗАТОРИМА СА НАСУТОМ ИСПУНОМ	39
6.1	Улазне величине	40
6.1.1	Улаз воде.....	40
6.1.2	Улаз гаса	43
6.1.3	Проток водене паре кроз испуну	44
6.2	Својства воде и водене паре под вакуумом	45
6.2.1	Енталпија	45
6.2.2	Густина.....	46
6.2.3	Специфични топлотни капацитет при константном притиску.....	47
6.2.4	Вискозност.....	47

6.2.5	Коефицијент дифузије	49
6.3	Операциона линија процеса	49
6.4	Одређивање висине испуне при континуалном контакту гаса и течности	52
6.5	Одређивање излазних концентрација за задату висину испуне	54
6.6	Димензионисање вакуум пумпе.....	55
6.7	Инфилтрација.....	56
6.7.1	Сопствена инфилтрација	56
6.7.2	Препоруке из литературе	57
6.8	Статистички показатељи	58
7	ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИНСТАЛАЦИЈА И ПОСТУПАК МЕРЕЊА	59
7.1	Опис инсталације	59
7.2	Поступак мерења.....	63
7.2.1	Проток азота	65
7.3	Инфилтрација.....	66
8	АНАЛИЗА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИХ РЕЗУЛТАТА	67
8.1	Анализа резултата мерења инфилтрације.....	67
8.2	Критеријуми за процену прихватљивости радног режима	69
8.3	Поређење корелација на основу висине јединице преноса.....	69
8.4	Квалитет корелација предложених у [19] и [20]	70
8.5	Анализа резултата испитивања процеса деоскигенације	75
9	ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА	79
10	ЛИТЕРАТУРА.....	81
	ПРИЛОЗИ	83
	ПРИЛОГ 1 – Резултати мерења инфилтрације	84
	ПРИЛОГ 2 – Резултати експерименталних мерења	85
	ПРИЛОГ 3 – Одбачени радни режими	90
	БИОГРАФИЈА АУТОРА	91

Номенклатура

A , m^2 , површина

c_p , $kJ/kmolK$, специфични топлотни капацитет

D , m^2/s , коефицијент дифузије

\dot{F} , mol/s , проток хемијски припремљене воде

Fr , Фрудов број

\dot{G} , mol/s , проток гаса

g , m/s^2 , убрзање земљине теже

Ga , Галилејев број

H , $Pa/[kmolA/kmol(A+B)]$, Хенријева константа

h , J/mol , специфична енталпија

k , $mol(i)/m^2 \cdot s \cdot \Delta u$, коефицијент пролаза супстанције

\dot{L} , mol/s , проток течност

l , m , дужина

M , $kg/kmol$, моларна маса

m , нагиб криве

n , mol , број молова

N , mol/s , молски проток

p , Pa , притисак

P , W , снага

R , $J/molK$, универзална гасна константа

Re , Рејнолдсов број

RV , релативна влажност

SF , фактор величине вакуум пумпе

s_v , m^2/m^3 , специфична површина испуне

$s_{v,IG}$, m^2/m^3 , специфична стварна површина контакта гаса и течности

Sh, Шервудов број

t , °C, температура

T , K, апсолутна температура

\dot{V} , mol/s, проток гаса (паре)

w , m/s, брзина струјања

We, Веберов број

x , mol(A)/mol(A+B+C), молски удео кисеоника у течности

y , mol(A)/mol(A+B+C), молски удео кисеоника у гасу

z , m, висина насутог слоја

Доњи индекси

A, кисеоник

B, вода и водена пара

C, азот

D , десорпција

F , улазна сировина

fl , тачка загревања

G , гас

Gen , генерисани

i , i -та компонента у мешавини

Inf , инфилтрација

$kond.$, кондензација

L , течност

lo , тачка оптерећења

m , мешавина

p , притисак

R , редуковано

t , атмосферски услови

x , течност

y , гас

Горњи индекси

$*$, равнотежно стање

Грчки симболи

β , $\text{kmolA/m}^3 \cdot \text{s} \cdot \Delta x(\Delta u)$, коефицијент прелаза супстанције

δ , m , дебљина

ε , m^3/m^3 , порозност

μ , Pa , динамичка вискозност

π , константа

ρ , kg/m^3 , густина

σ , N/m , површински напон

τ , s , време

φ , акумулација течности у испуни

ψ , коефицијент (интензитет) квашења

СПИСАК СЛИКА

Слика 2.1 Равномерна (а) и локална (б) корозија	3
Слика 2.2 Врсте корозије	5
Слика 2.3 Настанак рђе	7
Слика 2.4 Насута испуна	9
Слика 2.5 Структурна испуна	9
Слика 2.6 Могуће изведбе вакуумских дегазатора.....	10
Слика 3.1 Шема ценовода и инструментације постројења за дегазацију напојне воде у ТО Баново брдо	13
Слика 3.2 Постројење за дегазацију напојне воде у ТО Баново брдо	15
Слика 4.1 Карактеристичне радне тачке колоне са испуном према [20].....	22
Слика 5.1 Рекуператор топлоте са бајонетним цевима и прикључцима	28
Слика 5.2 Пресек цеви рекуператора са карактеристичним величинама.....	30
Слика 5.3 Површина за размену топлоте бајонетног рекуператора	32
Слика 5.4 Мерне позиције рекуператора.....	35
Слика 6.1 Улазне и излазне величине колоне	41
Слика 6.2 Равнотежна и операциона линија процеса деоксигенације.....	50
Слика 6.3 Улазне и излазне величине колоне	51
Слика 6.4 Елементарна површина за размену супстанције	52
Слика 7.1 Шематски приказ инсталације са карактеристичним параматрима.....	60
Слика 7.2 Палови прстенови - испуна	61
Слика 7.3 Сензор за мерење O_2 у води	62
Слика 7.4 Централна управљачка јединице	62
Слика 7.5 Експериментална колона	64
Слика 7.6 Мерна стаза за мерење протока азота.....	65
Слика 8.1 Дијаграм инфилтрације.....	67
Слика 8.2 Извори инфилтрације.....	68
Слика 8.3 Паритетни дијаграм према [20]	70
Слика 8.4 Паритетни дијаграм према [19].....	71
Слика 8.5 Паритетни дијаграм удела кисеоника у води на излазу из колоне према [20]	72
Слика 8.6 Паритетни дијаграм удела кисеоника у води на излазу из колоне према [19]	73
Слика 8.7 Утицај протока фаза на висину јединица преноса [20]	74
Слика 8.8 Утицај протока фаза на висину јединица преноса [19]	74
Слика 8.9 Паритетни дијаграм <i>HTU</i>	76
Слика 8.10 Промена односа <i>HTU</i> у функцији од параметра <i>FLG</i>	77
Слика 8.11 Квалитет новопредложене корелације (8.10).....	78

СПИСАК ТАБЕЛА

Табела 4.1 Критични површински напон материјала испуне.....	19
Табела 4.2 Емпиријски коефицијенти за различите типове испуне из [20]	25
Табела 5.1 Номенклатура бајонетних размењивача топлоте.....	29
Табела 5.2 Параметри топлотних перформанси рекуператора	30
Табела 5.3 Топлотне перформансе шеме струјања RT и FA	33
Табела 5.4 Топлотне перформансе шеме струјања TF и AR	34
Табела 6.1 Састав сувог ваздуха на стандардним условима.....	39
Табела 6.2 Константе у једначинама за израчунавање термофизичких својстава	47
Табела 6.3 Константе у једначинама за израчунавање динамичке вискозности	48

Табела 6.4 Параметри у једначини (6.79)	57
Табела 7.1 Карактеристике испуне.....	61
Табела 7.2 Карактеристике анализатора кисеоника	61
Табела 7.3 Опсеги промена параметара током мерења.....	63
Табела 7.4 Протоци азота мерени преко U-цеви.....	64
Табела 8.1 Статистички показатељи процедура	71
Табела 8.2 Квалитет новопредложене корелације (8.10)	76
Табела 8.3 Упоредни преглед корелација.....	77

1 УВОД

Операција дегазације воде, односно уклањање растворених гасова, првенствено угљен-диоксида и кисоника (деоксигенација), из процесне и напојне воде у циљу спречавања оштећења металних елемената постројења настала дејством корозије, представља једну од основних мера у превентиви ових оштећења.

Поред неколико метода дегазације које се примењују у индустријској пракси, као најекономичнија показала се вакуумска дегазација која се обавља у колонама различитог типа, најчешће су у примени колоне са испуном.

Катедра за процесну технику Машинског факултета Универзитета у Београду се преко тридесет година бави истраживањем радних параметара различитих типова колона. Истраживања су обухватила како колоне са практично свим типовима испуне који се могу срести у индустријској пракси, тако и колоне са подовима. Области обухваћене истраживањем су размена топлоте и супстанције, као и флуидодинамички параметри ових апарата.

У циљу како научног тако и доприноса традицији Катедре за процесну технику, ова дисертација се бави анализом процеса размене супстанције у колонома са испуном при вакуумској дегазацији воде. У индустријској пракси, овај тип апарата налази примену не само у термо-енергетским постројењима, већ и у велико броју различитих процесних погона.

Циљ ове дисертације је како провера постојећих релевантних прорачунских процедура овог типа апарата тако и развој прецизније процедуре за моделирање процеса размене супстанције и димензионисање предметног типа апарата.

Из циља истраживања проистичу следећи задаци истраживања:

- преглед и систематизација прорачунских процедура препоручених у досадашњим радовима и литератури;
- израда математичког модела вакуумског дегазатора;
- спровођење експерименталних истраживања на индустријском постројењу за дегазацију напојне воде;
- формирање прорачунске процедуре за коефицијент прелаза супстанције у течности;
- извођење закључака.

2 ДЕГАЗАЦИЈА И КОРОЗИЈА

2.1 Дегазација и појам деоксигенације

Дегазација, у ширем смислу, представља процес уклањања растворених гасова из течности, претежно из воде. Уколико је основна намена постројења уклањање кисеоника, односно ако се контрола процеса врши у односу на садржај кисеоника у води на излази из дегазационог постројења, онда је реч о деоксигенацији.

Код котловских постројења и система даљинског грејања, дегазација представља саставни део постројења за припрему воде и основна намена јој је издвајање кисеоника и угљен-диоксида из процесне воде. Кисеоник у контакту са металним елементима постројења изазива корозију, док угљен-диоксид у води формира угљену киселину чији низак рН поспешује корозију изазвану кисеоником.

Према [1] дозвољен садржај кисеоника након дегазације износи $20 \text{ppb}_{\text{mas}}$, док је угљен-диоксид при овом садржају кисеоника практично уклоњен у потпуности.

2.2 Корозија

Израз корозија потиче од латинског глагола *corrodere* што значи гристи, нагризати и описује појаву оштећења површине проузроковану медијумом са којим је у контакту [2]. Имајући ову општу дефиницију корозије у виду, може се рећи да, поред метала, и остали материјали, као што су керамика, бетон и пластика, могу кородирати. Код метала корозија је, услед електропроводности, електрохемијске природе, док је код нпр. пластике и керамике узрок корозије физички-хемијско дејство. Генерално уколико није наведен материјал, под појмом корозија се мисли на корозију код метала.

Код корозије челика, услед контакта са водом која садржи растворени кисоник, долази до формирања гвожђе хидроксида $\text{Fe}(\text{OH})_3$, који се таложи на металним површинама у виду браонкасто – црвених наслага. Овај слој представља баријеру за продор кисоника као основном материјалу при чему долази до успоравања корозије. Међутим, код процесних постројења, услед струјања флуида, овај слој еродира, па је тако омогућен несметан контакт основног материјала и воде односно кисеоника. Уколико је количина кисеоника у води ограничена, односно уколико је извршена адекватна деоксигенација воде, формира се оксид гвожђа Fe_3O_4 , уместо продуката корозије $\text{Fe}(\text{OH})_3$, који може бити црне или зелене боје.

У односу на корозију челика, код нпр. бакра и алуминијума, продукти корозије стварају континуални слој оксида који је чврсто везан за структуру материјала и на тај се начин формира изузетно отпоран заштитни слој, коју онемогућава директни контакт околине и основног материјала.

С обзиром на претходну анализу, можемо закључити да је корозија изузетно непожељна појава (посебно код постројења, опреме, конструкција од челика), с тим што у неким случајевима може имати позитивно дејство (бакар, алуминијум).

2.2.1 Трошкови везани за корозију

Трошкови услед корозије могу се поделити у две групе [2]:

- трошкови заштите од корозије,
 - прва заштита од корозије;
 - заштита од корозије приликом планираног одржавања.
- трошкови настали услед оштећења проузрокованих корозијом,
 - примарна оштећења која могу проузроковати:
 - непланирани застој производње;
 - замена елмената и опреме.
 - секундарна оштећења која могу проузроковати:
 - смањење капацитета производње;
 - губитак квалитета производа;
 - смањење ефикасности;
 - контаминацију производа.

Седамдесетих година 20-ог века вршена је процена трошкова насталих услед корозије. Тако су у Великој Британији 1970. године процењени годишњи трошкови настали услед неповољног дејства корозије износили 3,5% бруто националног дохотка (БДП) [3]. У Сједињеним Америчким Државама су, нпр. 1975. године ови трошкови износили 70 милијарди долара, што је у то време представљало 4,2% БДП-а [4]. У Савезној Републици Немачкој су трошкови настали услед дејства корозије 1980. године били 4% БДП-а [5]. Из претходно наведених података, може се закључити да трошкови услед неповољног дејства корозије просечно износе 4% БДП-а.

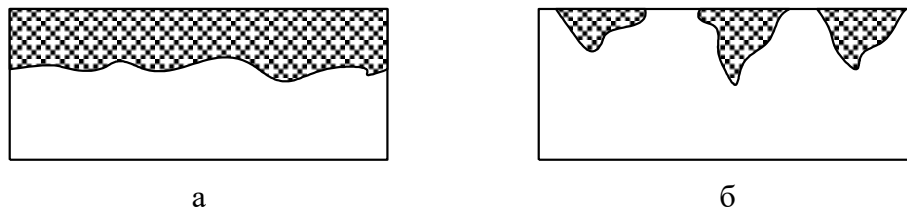
Такође треба напоменути, да су ове вредности потврђене и од стране хемијске индустрије Немачке, где се наводи да директни и индиректни трошкови настали услед појаве корозије износе 4% од укупног промета [5]. Интересантан је податак, да је у Савезној Републици Немачкој, 1990. године, укупни промет хемијске индустрије био 176 милијарди немачких марака, од којих је 4,5% потрошено на одржавања (7,9 милијарди марака), а од тога 4 милијарде марака на оштећења настала корозијом [6,7], што представља више од половине средстава утрошених на одржавање.

2.2.2 Типови корозије и проузрокованих оштећења

Услед комплексног утицаја околног медијума на стварање корозије, у литератури се може наћи већи број критеријума на основу којих се врши класификација корозије. Најчешће је то тип и начин оштећења, интензитет корозије, узрок као и својства медијума који је у контакту са материјалом који је изложен корозији.

У пракси, најчешћа подела оштећења насталих услед корозије је подела према врсти. Према овој подели корозија може бити [8]:

- равномерна (слика 1.1а);
- локална (слика 1.1б).



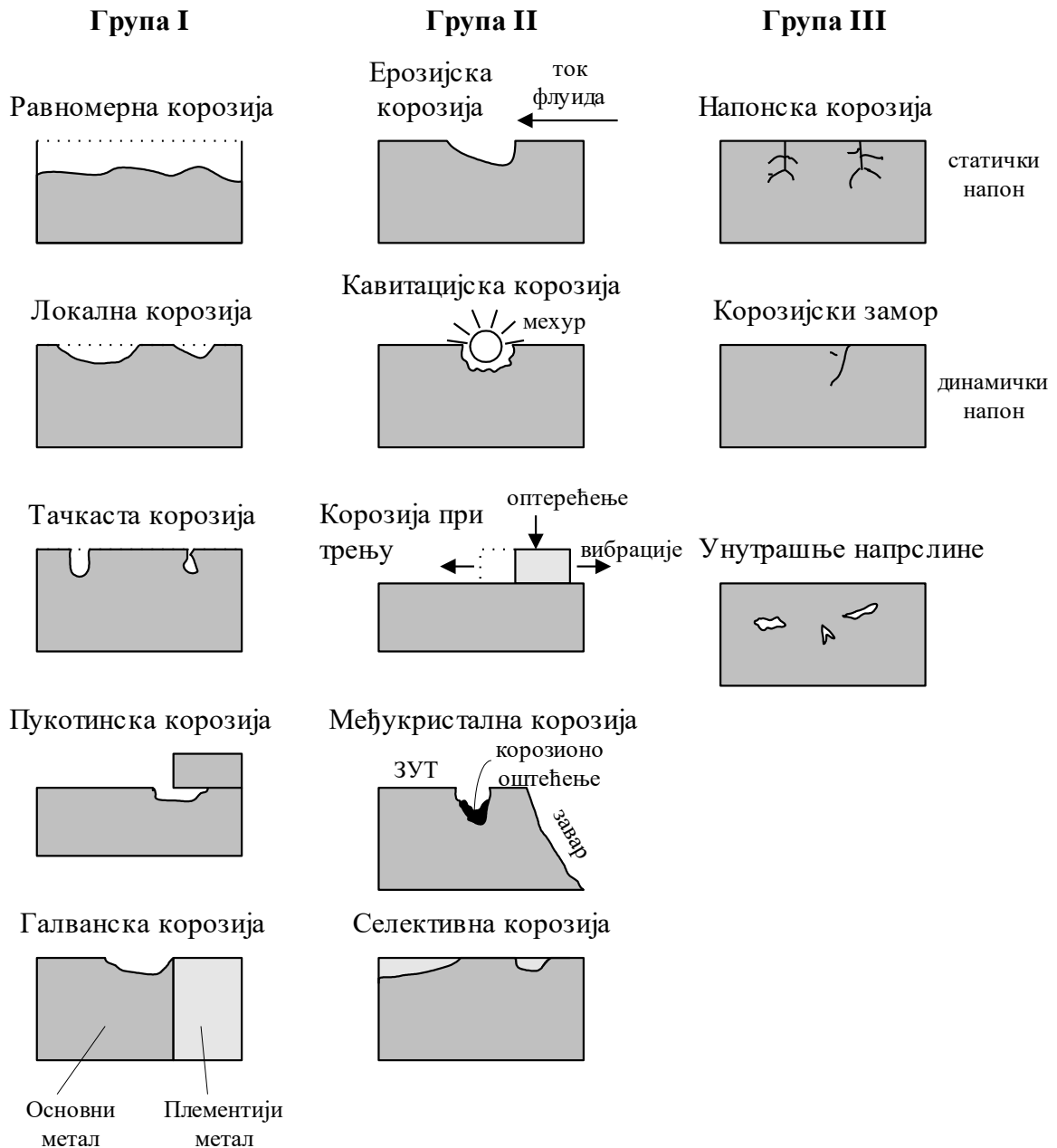
Слика 2.1 Равномерна (а) и локална (б) корозија

С обзиром на чињеницу да је равномерну корозију могуће поуздано предвидети док локалну није, већина ломова и оштећења настаје услед локалне корозије.

Подела корозије се врло често врши на основу изгледа кородираниог материјала:

- **галванска корозија:**
галванска корозија настаје при контакту племенитог и неплеменитог метала, при чему су оба метала у контакту са електролитом који садржи кисоник или киселину која доприноси одржавању процеса.
- **тачкаста корозија (pitting):**
тачкаста корозија може настати у одсуству кисеоника, али у присуству других елемената као што је на пример хлор. Он може довести до местимичног оштећења слоја оксида на материјалу и тако га локално угрозити, при чему тачкаста корозија може да продре дубоко у материјал, а да се не види голим оком.
- **пукотинска корозија:**
пукотинска корозија је карактеристична у зазорима и пукотинама између два тела.
- **интеркристална корозија:**
интеркристална корозија се јавља на граници између кристалних зрна. Карактеристична је за заварене спојеве.

- **напонска корозија:**
напонска корозија настаје при истовременом дејству напона и локалне корозије када се у материјалу јављају напрстине које могу довести до лома.
- **ерозијска корозија:**
ерозијска корозија је последица комбинованог дејства корозије и ерозије. У овом случају присутно је интензивно локално трошење метала услед струјања агресивног флуида преко површине метала.
- **корозијски замор:**
корозијски замор настаје на елементима конструкција који су изложени комбинованом дејству медијума (који може бити агресиван) и динамичким напрезањима.
- **кавитацијска корозија:**
кавитацијска корозија настаје на елементима код којих се јавља кавитација.
- **корозија при трењу:**
корозија при трењу настаје на површинама које су изложене трењу.
- **селективна корозија:**
селективна корозија се јавља у нпр. двокомпонентним легурама, када кородира неплеменитија легура (нпр. децинкација месинга).
- **корозија услед лутајућих струја:**
корозија услед лутајућих струја се јавља на деловима површине који су аноде под дејством лутајућих струја.
- **корозија испод наслага страног материјала:**
под условима при којим настаје, односно у зависности од медијума, корозија може бити водонична, нискотемпературска, високотемпературска, корозија изазвана микробима, итд.



Слика 2.2 Врсте корозије

Ових 12 основних облика корозије се могу сврстати у три групе [9]:

- Група I: корозија се може лако утврдити визуелним прегледом (униформна, тачкаста, галванска, пукотинска);
- Група II: корозија се може утврдити додатним испитивањем (ерозијска, кавитацијска, корозија при трењу, интеркристална, селективна);
- Група III: корозија се углавном може тачно утврдити микроскопским прегледом, мада се у неким случајевима може установити и голим оком (напонска, корозијски замор).

Посебно опасне су тачкаста, пукотинска, интеркристална корозија као и она која настаје при истовременом деловању агресивног флуида и механичких напрезања елемената.

Последња два типа корозије су посебно опасна с обзиром да могу изазвати изненадни лом конструкције.

2.2.3 Механизми корозије

Корозија према механизму настајања може бити:

- хемијска и
- електрохемијска.

Хемијска корозија настаје услед интеракције металне површине и медијума која се одвија као хетерогена хемијска реакција. При хемијској корозији прелаз метала у јонско стање и редукција оксидационе компоненте нису независне појаве у времену и простору. Пример је реакција метала која се јавља при контакту са течним неелектролитима или сувим гасовима.

Електрохемијска корозија је карактеристична за металне површине које су изложене електролитима и влажним гасова (вода, раствори различитих хемијских једињења, земља, филм влаге који се формира на металној површини при кондензацији, адсорпцији, итд).

Упрошћено, електрохемијска корозија настаје истовременим одвијањем две реакције на местима контакта површине и медијума. У првој реакцији долази до издвајања електрона из метала (услед чега атоми метала постају позитивни јони) који се потом везују за атоме медијума услед чега се формирају негативни јони. У другој реакцији позитивни јони метала се везују са негативним јонима медијума при чему долази до трошење метала или настанка слоја на површини. С обзиром да метал отпушта електроне, у овом процесу оксидације који се у њему одвија, он представља аноду. Такође, с обзиром да медијум прима електроне, он у овом процесу представља катоду и у њему се одвија редукција.

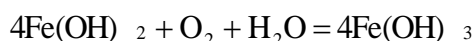
Електрохемијска корозија је најраспрострањенији облик корозије у природи. У процесним и енергетским постројењима је посебно значајна електрохемијска корозија челичних површина услед присуства кисеоника у води.

2.2.4 Корозија проузрокована кисеоником у води

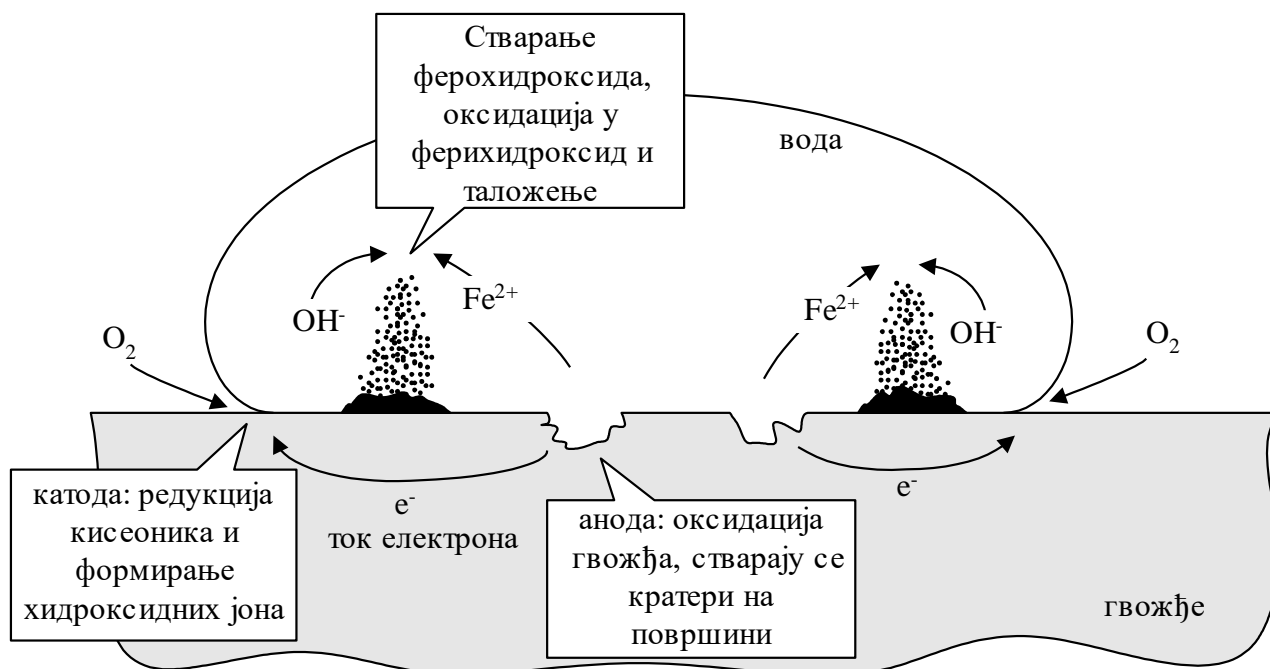
Електрохемијска корозија се одиграва на следећи начин, при чему је крајњи производ гвожђе хидроксид $\text{Fe}(\text{OH})_2$:



Уколико постоји довољно кисеоника за континуално одвијање реакција, анода кородира, при чему се из продукта реакције $\text{Fe}(\text{OH})_2$ у присуству воде и кисеоника ствара ферихидроксид $\text{Fe}(\text{OH})_3$, односно браонкасто-смеђи слој познатији као рђа, према реакцији

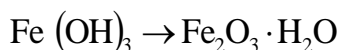


На слици 1.3 је приказан настанак $\text{Fe}(\text{OH})_2$ и његова трансформација у рђу на металу у контакту са водом као медијумом.



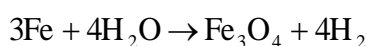
Слика 2.3 Настанак рђе

Ферихидроксид се трансформише у хидрат фериоксида (црвена рђа) обично при условима који су карактеристични за системе који нису у погону или у цевоводима кондензата



Хидрат фериоксида се може при одређеним условима трансформисати у минерал хематит (Fe_2O_3).

Уколико у води нема кисеоника, при вишим температурама карактеристичним за котлове у раду (изнад $100 \div 120^\circ\text{C}$), ствара се магнетит и гасовити водоник према збирној реакцији



При нижим температурама (испод 100°C) у алкалној средини $\text{pH} = 9,6 \div 12$ на површини се формира заштитни слој ферихидроксида $\text{Fe}(\text{OH})_3$ [11].

Под одређеним условима на површини метала се може формирати заштитни слој који има утицај на брзину корозије. Ако тај слој поседује одређена механичка својства и ако је слабо растворљив у медијуму, а уз то и добро пријања на металну површину онда тај заштитни слој може значајно успорити електрохемијску корозију (у том случају се ради о пасивизацији). Заштитни слој првенствено чине оксиди гвожђа (FeO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4) и хидрати оксида гвожђа ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{Fe}_3\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), а његов састав зависи од радних услова. Ако је извршена добра деоксигенација воде, онда заштитини слој формирају магнетит (Fe_3O_4) или хематит (Fe_2O_3) [12].

Магнетит се таложи као рђа црне боје и формира заштитни слој дебљине између $2 \div 25 \mu\text{m}$ [13], који чврсто пријања уз површину и успорава даљу корозију елемената. Временом слој магнетита постаје дебљи, порозан и пуца, па губи своја заштитна својства.

Корозија изазвана дејством кисеоника раствореног у води ствара кратере на металној површини односно реч је о тачкастој (*pitting*) корозији. Према претходно датој подели у питању је локална корозија, која може продрети и 100 пута дубље у метал од равномерне корозије и изазвати изненадни лом.

Уколико није извршена добра деоскигенација напојне воде у котловском постројењу, долази до појаве тачкасте корозије и то првенствено на предгрејачима и економајзерима.

2.3 Основне методе дегазације напојне воде

У индустријској пракси методе за дегазацију воде се могу поделити на физичке и хемијске.

Физичке методе су:

- термичка дегазација;
- вакуумска дегазација;
- десорпција помоћу инертних гасова.

У овом ради разматра се само вакуумска дегазација односно деоскигенација. Хемијска односно каталитичка дегазација се може применити након вакуумске ради потпуног уклањања кисеоника из воде.

2.3.1 Вакуумска дегазација воде

При вакуумској дегазацији, операција се обавља у апаратима на сниженом притиску, при чему је удео кисеоника у води директно пропорционалан апсолутном притиску у апарату. Услед вакуума, односно промењених равнотежних услова, долази до десорпције гасова из воде, који се одводе из апарата посредством вакуум пумпе или ејектора.

У циљу смањења габарита апарата, може се применити следеће:

- загревање воде пре уласка у апарат;
- додавање азота.

Генерално, уколико се предвиди и загревање воде и додавање одређене количине азота, могуће је остварити економичнији и ефикаснији рад постројења.

У случају загревања, температура улазне воде при вакуумској дегазацији не прелази 35°C за разлику од термичке дегазације где је температура воде око 105°C.

2.3.2 Типови вакуумских дегазатора

У општем случају, све врсте колона које омогућавају добро распршивање течности могу бити предвиђене за вакуумске дегазаторе (слика 2.6). Међутим у индустријској пракси најчешће се срећу колоне са испуном због ниског пада притиска и велике површине контакта између фаза. Испуна може бити насута (неуређена, слика 2.4) и структурна (уређена, слика 2.5), у зависности од процеса. У случају неуређене испуне најчешће су у употреби Палови и Рашигови прстенови, који могу бити од пластике, метала или керамике, у зависности од радног медијума.



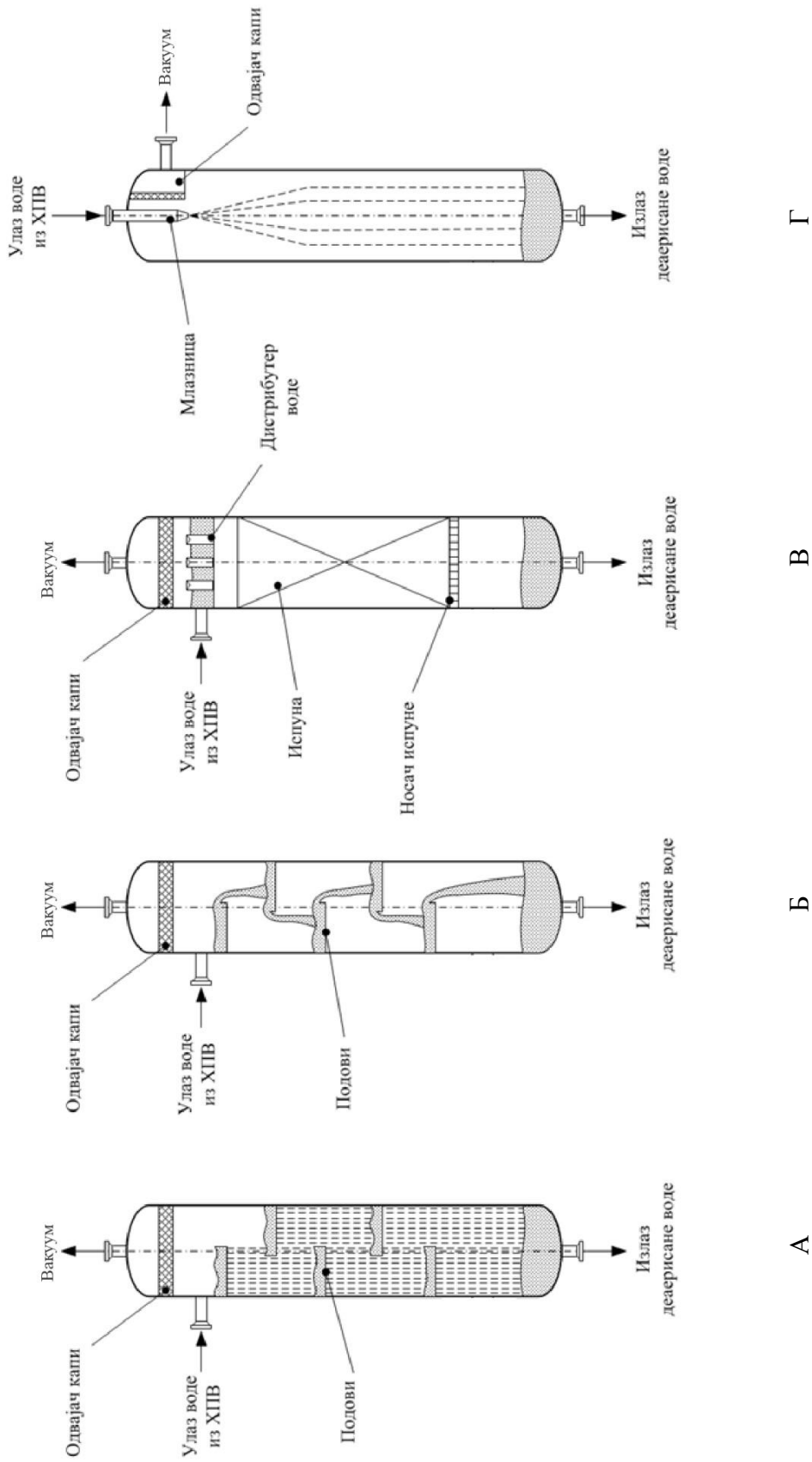
Слика 2.4 Насута испуна



Слика 2.5 Структурна испуна

Радни притисак деоксигенатора се креће у опсегу од 2000 – 5000 РаА, док се температура креће у опсегу од 17 – 32°C. Битно је да се напомене да од избора притиска зависи и економичност процеса, с обзиром да снага мотора вакуум пумпе зависи од притиска који се остварује на усисној прирубници пумпе.

Уколико се примени загревање воде на улазу у колону и увођење азота на дно колоне, уз избор притиска као трећег параметра, постижу се три степена слободе, чијом се варијацијом може остварити минимум погонских трошкова дегазатора.



Слика 2.6 Могуће изведбе вакуумских дегазатора

3 ОПИС ПОСТРОЈЕЊА ЗА ВАКУУМСКУ ДЕГАЗАЦИЈУ

Постројење за вакуумску дегазацију топлане на Бановом брду се састоји од дегазационе колоне са дефлегматором, вакуум пумпе и пратеће пумпе за дегазирану воду прикључене на резервоар испод колоне. Вакумска колона се напаја азотом одговарајуће чистоће који се добија из генератора азота или мобилних боца. У току рада вода се загрева помоћу електричног котла.

Након деминерализације, вода (тзв. ДЕМИ вода) садржи значајну количину растворених атмосферских гасова: азота, кисеоника ($\sim 11 \text{ ppm}_{\text{mas}}$), угљен-диоксида, као и других гасова. За потребе котловских постројења или за допуну система даљинског грејања, вода се мора ослободити првенствено кисеоника и угљен-диоксида.

Коначна концентрација кисеоника у деоксигенизованој води треба да износи максимално $30 \text{ ppm}_{\text{mas}}$, чиме је задовољен услов примене хемијских једињења (скевенцера) која омогућавају потпуно одстрањивање кисеоника.

На слици 3.1 приказан је дијаграм цевовода и инструментације технолошког поступка деоксигенације воде са њеним предгревањем, као и карактеристични процесни токови.

Хладна хемијски припремљена вода температуре испод 20°C се преко електромоторног вентила FC-404 и неповратног вентила HA-305 доводи до мерно-регулационе групе одакле се уводи у цеви дефлегматора PK-101, који је постављен на десорпционој колони K-101. Проток воде се мери помоћу мерила FIC-116 на основу чије вредности се одржава проток у захтеваном опсегу. Притисак и температура воде се контролишу помоћу манометра PI-114 и термометра TI-115. Након мерно-регулационе групе вода се уводи у дефлегматор PK-101.

Вода из дефлегматора незнатно повишене температуре пролази кроз рамењивач топлоте бајонетног типа (рекуператор BRT-102) у коме се топлота деоксигенизоване воде користи за предгревање улазне воде. Температура воде пре уласка у колону K-101 се у зимском режиму рада подешава на жељену вредност у плочастом рамењивачу топлоте PRT-103 односно у електричном котлу EK-101 у летњем режиму рада постројења, а на основу мерења концентрације кисеоника у финалном производу ради достизања жељеног степена десорпције воде и не треба да прелази 30°C . На прикључцима са стране воде се налазе ручни преградни вентили.

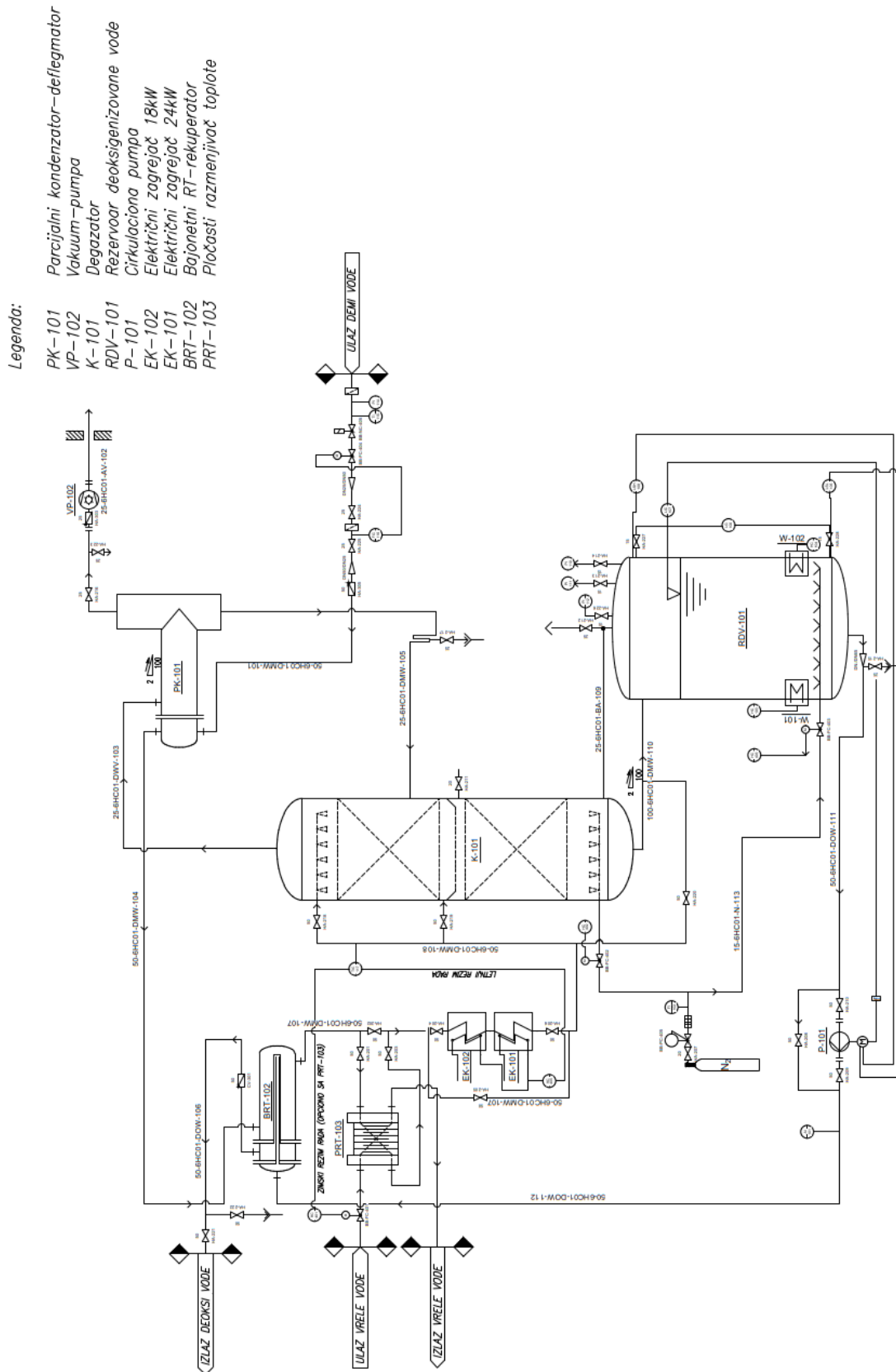
У летњем режиму се за загревање користи електрична енергија, како је приказано на дијаграму.

Након загревања вода се уводи у вакум десорбер K-101 са комадном испуном. На врху десорбера је постављен дистрибутер течности који обезбеђује равномерно квашење испуне. Основна улога испуне је да се оствари велика површина контакта течности и гаса у десорберу, што ће осигурати ефикасну десорпцију кисеоника и угљен-диоксида из воде. Вода која је прошла кроз десорбер K-101 се слива у проточни резервоар RDV-101, на коме је постављен сензор нивоа LIC-107, мерила за детекцију минималног LSL-105 и максималног LSH-108 нивоа, као и нивоказно стакло. Даље се помоћу пумпе P-101, преко неповратног вентила CV-301 транспортује ка потрошачима пролазећи кроз рекуператор BRT-102. Концентрација кисеоника се мери уређајем AI-101. На основу измерене вредности раствореног кисеоника, задаје се проток азота и/или температура воде на улазу у десорбер. Славина за узимање узорака воде и дренажу система HA-215 је постављена на цевоводу непосредно испод резервоара RDV-101. Деоксигенизована вода се помоћу пумпе P-101 шаље према рекуператору BRT-102, а након хлађења у њему транспортује се ка резервоару припремљене воде.

С обзиром да је жељена концентрација кисеоника у води ниска (реда величине од неколико десетина ppb_{mas}) потребно је поред велике површине контакта течности и гаса обезбедити и погодну погонску силу процеса десорпције, што се обезбеђује комбинованим деловањем вакуума и инертног гаса. Инертни гас је азот, који има најповољнију цену, али се могу користити и други инертни гасови (аргон, хелијум).

На цевоводу азота се непосредно након излаза из боце/генератора налази запорни вентил НА-207, вентил за снижење притиска азота до задате вредности РС-405 која се одржава у десорберу К-101, филтер и мерило протока FI-102. Уколико је потребно може бити постављен и електрични загрејач азота. Коначно се азот на жељеној температури уводи на дно вакуум десорбера К-101.

Дефлегматор РК-101 је добошасте размењивач топлоте постављен на врху вакуум десорбера К-101. Кроз међуцевни простор дефлегматора протиче мешавина водене паре и десорбованих гасова (азота, кисеоника и угљен-диоксида) са врха колоне. Ова мешавина гасова се на улазу у дефлегматор налази на температури десорпције, која максимално износи 30°C .

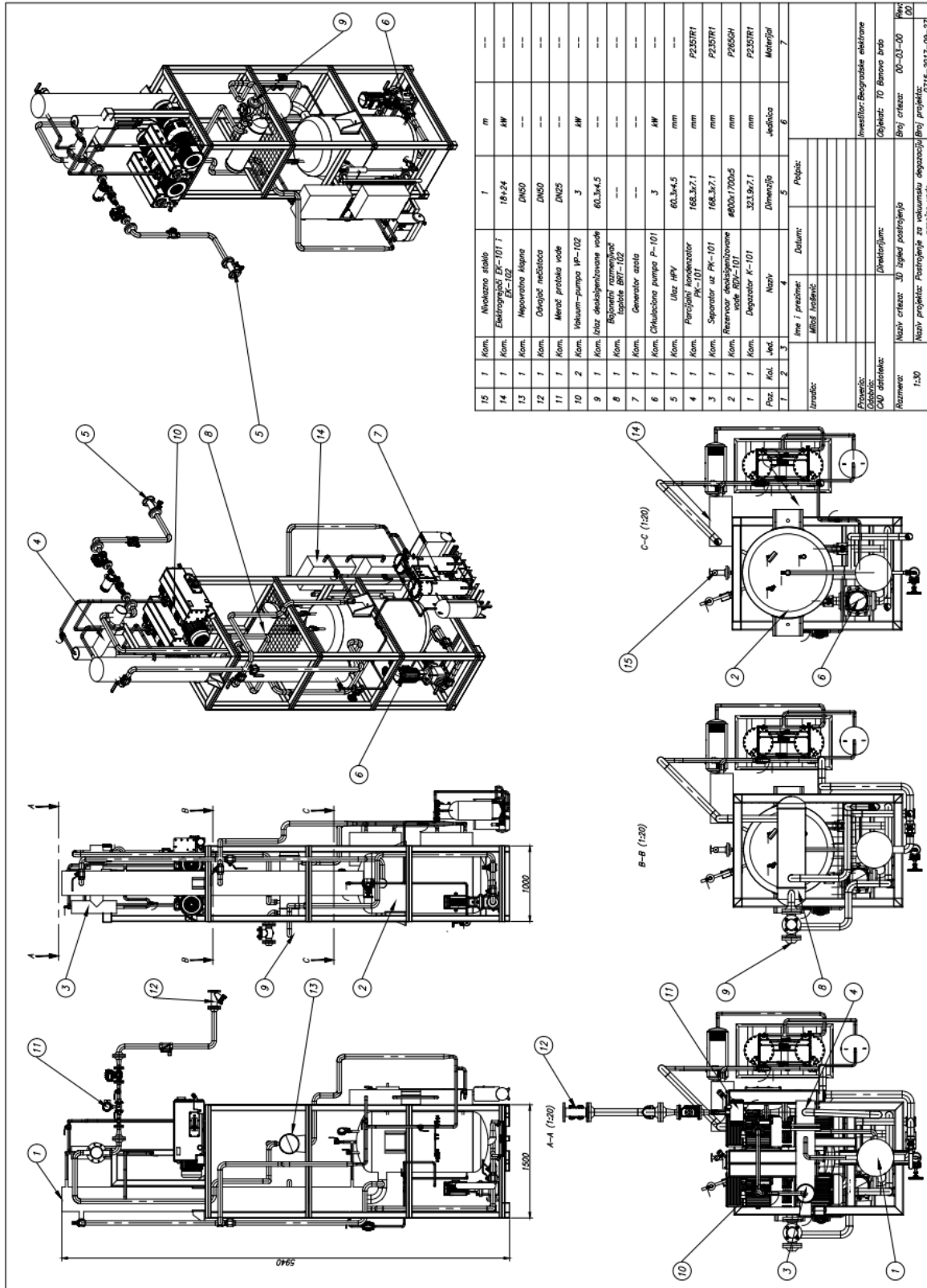


Слика 3.1 Шема цевовода и инструментације постројења за дегазацију напојне воде у ТО Баново брдо

При проласку кроз дефлегматор гасна мешавина се хлади, уз кондензацију водене паре, што доводи до значајног смањења протока гаса који струји ка вакуум пумпи VP-102. Основна сврха овог процеса је смањење снаге погонског електромотора вакуум пумпе, а самим тим и потрошње електричне енергије у циљу смањења погонских и инвестиционих трошкова.

Након кондензације паре у дефлегматору РК-101 гасна струја пролази кроз сепаратор који је саставни део дефлегматора. Гасна фаза која напушта сепаратор је на притиску од $0,05 \pm 0,1 \text{ barA}$ и представља мешавину азота, водене паре, кисеоника и угљендиоксида. Ова гасна мешавина се уводи у вакуум пумпу VP-102 преко неповратног вентила НА-303, ручног преградног вентила НА-216 и вакуметра PI-118 одакле се одводи напоље.

Издвојена вода из сепаратора се повратним цевоводом, а преко U цеви враћа назад у вакуум десорбер К-101. На слици 3.2 приказан је 3D изглед постројења за дегазацију.



Слика 3.2 Постројење за дегазацију напојне воде у ТО Баново брдо

4 ПРЕГЛЕД ЛИТЕРАТУРНИХ ИЗВОРА

Дегазација воде под вакуумом је процес који се примењује у котловским постројењима још од тридесетих година двадесетог века. Развојем колона са испуном односно саме испуне као и вакуум пумпи и технологије вакуума, вакуумска дегазација постаје све ефикаснији и економичнији начин уклањања гасова из течности, па самим тим и вакуумски дегазатори почињу све више да добијају на значају, посебно у последњих двадесетак година. Међутим и поред тога, мали је број доступне литература која се бави конкретно овим типом апарата. С обзиром на ту чињеницу, у овом поглављу су поменути само најбитнији литературни извори који у данашње време заузимају најзначајније место у инжењерској пракси.

Генерално гледано, иако је дегазација у колонама са испуном релативно скоро уведена у индустрију, први општеприхваћени рад на тему размене супстанције у колонама са испуном датира још од 1968. године, аутора Какусабуруа Онде (Kakusaburo Onda) [19]. Овај рад представља један од најрелевантнијих из области размене супстанције у колонама са испуном, па се због тога често среће у инжењерској пракси.

Године 1989. немачки инжењер Рајнхард Билет (Reinhard Billet) објавио је рад на тему димензионисања атмосферских кондензатора са насутом испуном, који је базиран на мерењима у фабрици БАСФ (BASF – Badische Anilin- und Sodafabrik) из 1965. Билет је и у наредним годинама наставио да се бави истраживањем размене топлоте и супстанције у колонама са испуном.

Билет је 1994. године на основу полуемпиријског разматрања формирао процедуру за прорачун колона са испуном, која је објављена у [23]. Ова процедура је базирана на једној од највећих бази података из области колона са испуном. Касније, 1999. Билет је са колегом Михаелом Шултсом (Michael Schultes) формирао побољшану процедуру за прорачун размене супстанције у колонама са испуном која је објављена у [20].

Имајући у виду чињеницу да је доступност података о размени супстанције у колонама са испуном под вакуумом лимитирана, овај рад је базиран на два класична рада из области, радовима [19] и [20]. Ова два рада спадају у најрелевантније радове односно процедуре за прорачун размене топлоте и супстанције у колонама са испуном.

4.1 Интензитет транспорта супстанције у колонама са комадном испуном према [19]

Интензитет транспорта супстанције у колона са комадном испуном зависи од:

- интензитета транспорта супстанције у гасу (отпора прелазу супстанције у гасу);
- интензитета транспорта супстанције у течности (отпора прелазу супстанције у течности);
- интензитета квашења испуне (површине контакта гаса и течности у колони).

4.1.1 Коефицијент прелаза супстанције у течности

У [19] за одређивање коефицијента прелаза супстанције у течности предложен је следећи израз

$$\beta_L^e \cdot \left(\frac{\rho_L}{\mu_L \cdot g} \right)^{1/3} = 0,0051 \cdot \left(\frac{w_L \cdot \rho_L}{s_{vLG} \cdot \mu_L} \right)^{2/3} \cdot \left(\frac{\mu_L}{\rho_L \cdot D_L} \right)^{-1/2} \cdot (s_v \cdot d_{isp})^{0,4} \quad (4.1)$$

где је d_{isp} , m, номинална величина (пречник) испуне.

Ако се израз (4.1) трансформише у критеријалну једначину $Sh_L = f(Re_L, Sc_L)$ добиће се

$$Sh_L = \frac{\beta_L^e \cdot l_{Sh_L}}{D_L} = 0,0051 \cdot \frac{1}{s_v \cdot \delta_L} \cdot Re_L^{2/3} \cdot Sc_L^{1/2} \cdot (s_v \cdot d_{isp})^{0,4} \quad (4.2)$$

где су:

- $Re_L = \frac{w_L \cdot \rho_L}{\psi \cdot s_v \cdot \mu_L}$, Рејнолдсов број за течност;
- $Sc_L = \frac{\mu_L}{\rho_L \cdot D_L}$, Шмитов број за течност.
- $\delta_L = \left(\frac{\mu_L^2}{\rho_L^2 \cdot g} \right)^{1/3}$, дебљина течног филма који се слива преко испуне.

Карактеристична дужина у Шервудовом броју за течност је

$$l_{Sh_L} = \frac{1}{s_v} \quad (4.3)$$

Коефицијент прелаза супстанције у течности за еквимоларни супротносмерни транспорт је

$$\beta_L^e = Sh_L \cdot D_L \cdot s_v \quad (4.4)$$

где су:

- Sh_L , Шервудов број за течност;
- D_L , m²/s, коефицијент дифузије у течности.

4.1.2 Коефицијент прелаза супстанције у гасу

За израчунавање коефицијента прелаза супстанције у гасу у [19] предложен је израз

$$\beta_G^e \cdot \frac{R \cdot T}{s_v \cdot D_G} = 5,23 \cdot \left(\frac{w_G \cdot \rho_G}{s_v \cdot \mu_G} \right)^{0,7} \cdot \left(\frac{\mu_G}{\rho_G \cdot D_G} \right)^{1/3} \cdot \frac{1}{(d_{isp} \cdot s_v)^2} \quad (4.5)$$

Ако се претходни израз трансформише у критеријалну једначину $Sh_G = f(Re_G, Sc_G)$ добиће се

$$Sh_G = \frac{\beta_G^e \cdot l_{Sh_G}}{D_G} = C \cdot Re_G^{0,7} \cdot Sc_G^{1/3} \cdot \frac{1}{(d_{isp} \cdot s_v)^2} \quad (4.6)$$

где је C константа која зависи од карактеристичне дужине испуне

$$C = \begin{cases} 2,0 & \text{за } d_{isp} \leq 15\text{mm} \\ 5,23 & \text{за } d_{isp} > 15\text{mm} \end{cases}$$

Напомена: Карактеристична дужина у Шервудовом броју за гас је

$$l_{Sh_G} = \frac{1}{s_v} \quad (4.7)$$

4.1.3 Интензитет квашења испуне

Интензитет квашења испуне се дефинише у облику

$$\psi = \frac{s_{vLG}}{s_v} \quad (4.8)$$

где су:

- $s_v, \text{m}^2/\text{m}^3$, специфична површина испуне;
- $s_{vLG}, \text{m}^2/\text{m}^3$, стварна специфична површина контакта гаса и течности.

При нормалном радном режиму колоне, стварна површина контакта фаза је мања од специфичне површине испуне, па важи

$$\psi = \frac{s_{vLG}}{s_v} < 1 \quad (4.9)$$

Према [19] интензитет квашења се рачуна према изразу

$$\psi = 1 - \exp \left[-1,45 \cdot \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_L} \right)^{0,75} \cdot \left(\frac{w_L \cdot \rho_L}{s_v \cdot \mu_L} \right)^{0,1} \cdot \left(\frac{w_L^2 \cdot s_v}{g} \right)^{-0,05} \cdot \left(\frac{w_L^2 \cdot \rho_L}{\sigma_L \cdot s_v} \right)^{0,2} \right] \quad (4.10)$$

односно након трансформације у критеријални облик, једначина (4.10) је

$$\psi = 1 - \exp \left[-1,45 \cdot \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_{LG}} \right)^{0,75} \cdot Re_L^{0,1} \cdot Fr_L^{-0,05} \cdot We_L^{0,2} \right] \quad (4.11)$$

где су:

- $\sigma_c, \text{N/m}$, критични површински напон за материјал испуне (Табела 4.1);

- $w_L = \frac{4 \cdot \dot{V}_L}{D_k^2 \cdot \pi}$, m/s, брзина течне фазе сведена на пуни попречни пресек колоне (густина орошавања);
- $Re_L = \frac{w_L \cdot \rho_L}{s_v \cdot \mu_L}$, Рејнолдсов број за течност;
- $Fr_L = \frac{w_L^2 \cdot s_v}{g}$, Фрудов број за течност;
- $We_L = \frac{w_L^2 \cdot \rho_L}{\sigma_L \cdot s_v}$, Веберов број за течност.

Карактеристичне дужине за бездимензионе бројеве су:

- $l_{Re} = \frac{1}{s_v}$, m³/m², карактеристична дужина у Рејнолдсовом броју;
- $l_{Fr} = \frac{1}{s_v}$, m³/m², карактеристична дужина у Фрудовом броју;
- $l_{We} = \frac{1}{s_v}$, m³/m², карактеристична дужина у Веберовом броју.

Критеријалне једначине су валидне у следећем опсегу вредности бездимензионих бројева:

- $Re_L = 0,04 \div 500$
- $Fr_L = 2,5 \cdot 10^{-9} \div 1,8 \cdot 10^{-2}$
- $We_L = 1,2 \cdot 10^{-8} \div 0,27$
- $\frac{\sigma_c}{\sigma_{LG}} = 0,3 \div 2$

Однос критичног површинског напона за материјал испуне (табела 4.1) и површинског напона течности дефинише интензитет адхезионих сила присутних на површини испуне односно интензитет квашења површине испуне.

Табела 4.1 Критични површински напон материјала испуне

Материјал испуне	σ_c , N/m
Керамика	0,061
Метал	0,075
Пластика	0,033
Угаљ	0,056

4.2 Коефицијент прелаза супстанције у колонама са испуном према [20]

4.2.1 Коефицијент прелаза супстанције у течности

Према Хигбијевом пенетрационом моделу [17], коефицијент прелаза супстанције у течности је дефинисан као

$$\beta_L^e = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \sqrt{\frac{D_L}{\tau_L}} \quad (4.12)$$

где су:

- β_L^e , m/s, коефицијент прелаза супстанције у течности;
- D_L , m²/s, коефицијент дифузије у течности;
- τ_L , s, време контакта течности.

Време контакта течности зависи од количине течности у испуни, густине квашења и хидрауличког пречника испуне (d_h , m) и према [20] се израчунава као

$$\tau_L = \frac{\varphi \cdot d_h}{w_L} \quad (4.13)$$

где је d_h хидраулички пречник испуне и дефинисан је као

$$d_h = 4 \cdot \frac{\varepsilon}{s_v} \quad (4.14)$$

а φ акумулација течности у испуни која се у случају $w_G \leq w_{G,lo}$ рачуна као

$$\varphi = \varphi_{lo} = \left(\frac{s_v^2 \cdot \mu_L \cdot w_L}{\frac{1}{3} \cdot \rho_L \cdot g - \frac{\xi}{4} \cdot \frac{s_v}{\varphi_L \cdot (\varepsilon - \varphi_L)^2} \cdot \rho_G \cdot w_G^2} \right)^n \cdot \psi_h^{2/3} \quad (4.15)$$

у који је укључен и хидраулички коефицијент квашења Ψ_h .

Експериментално се дошло до следећих корелација за одређивање вредности хидрауличког коефицијента квашења испуне

$$\psi_h = \begin{cases} C_h \cdot \text{Re}_L^{0,15} \cdot \text{Fr}_L^{0,1} & \text{за } \text{Re}_L < 5 \\ 0,85 \cdot C_h \cdot \text{Re}_L^{0,25} \cdot \text{Fr}_L^{0,1} & \text{за } \text{Re}_L \geq 5 \end{cases} \quad (4.16)$$

Константа C_h у претходној једначини је дата у табели 4.2 заједно са осталим карактеристичним константама за испуну.

У [23] φ_L се одређује на основу израза

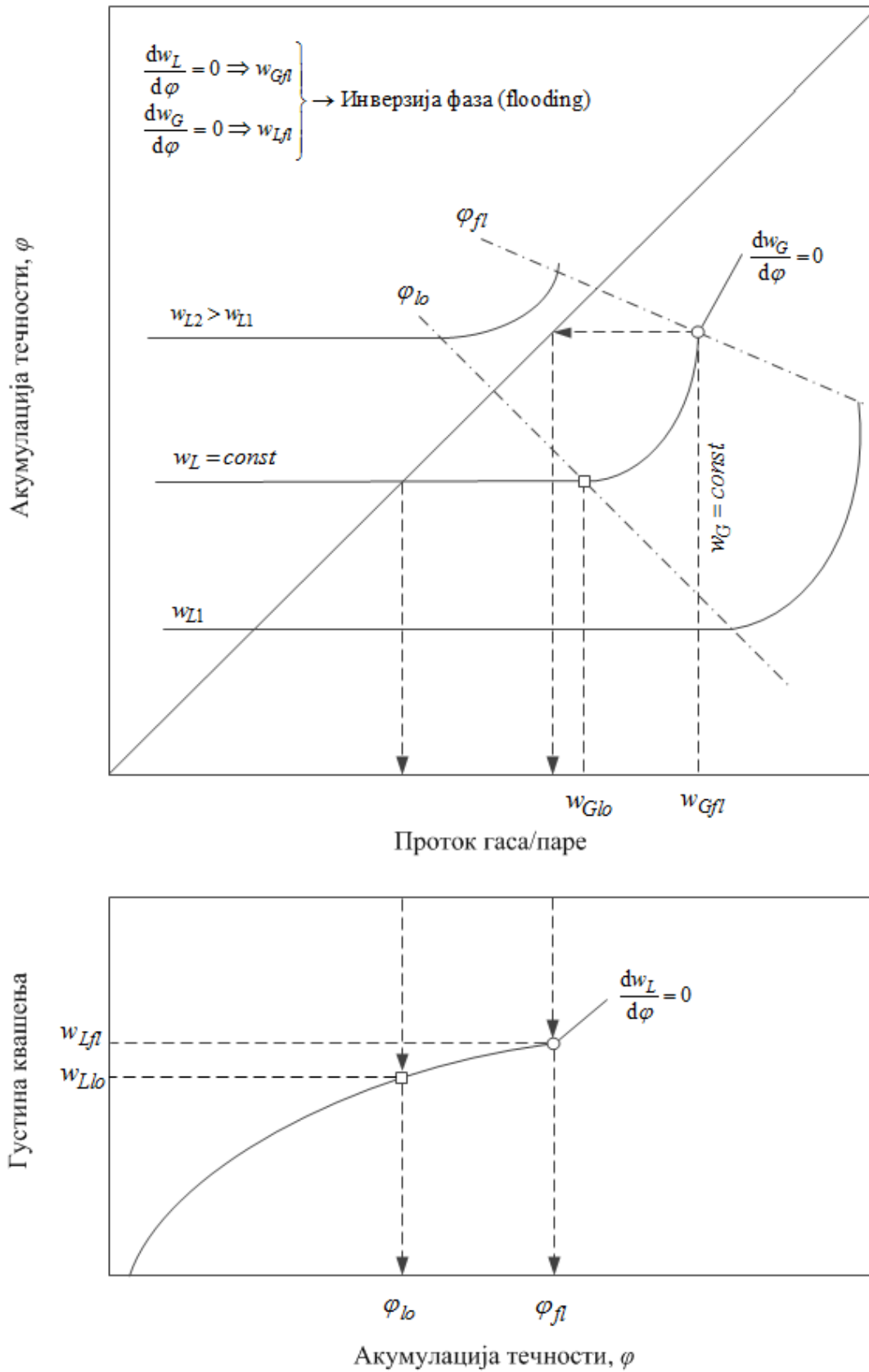
$$\varphi_L = \begin{cases} \varphi_{lo} & \text{за } w_G \leq w_{Glo} \\ \varphi_{lo} \cdot \left[1 + 1,2 \cdot \left(\frac{w_G}{w_{G,fl}} \right)^{13} \right] & \text{за } w_G > w_{Glo} \end{cases} \quad (4.17)$$

где су:

- $Fr_L = \frac{w_L^2 \cdot s_v}{g}$, /, Фрудов број за течност;
- w_G , m/s, брзина гаса сведена на пуни попречни пресек колоне;
- $w_{G,lo}$, m/s, брзина гаса у тачки оптерећења сведена на пуни попречни пресек колоне [20];
- $w_{G,fl}$, m/s, брзина гаса у тачки инверзије сведена на пуни попречни пресек колоне [20].

На слици 4.1 приказане су карактеристичне радне тачке колоне са испуном према [20].

Из претходних јеначина се може закључити да гранична радна тачка није тачка оптерећење, па би било коректније да се ова тачка назове тачка номиналног радног режима. Стварна брзина гаса (паре) кроз колону може бити нешто мања или нешто већа од брзине гаса при овом радном режиму, при чему треба водити рачуна о поштовању препроуке за брзину гаса у колони на основу које је однос стварне брзине гаса и брзине гаса у тачки инверзије фаза мањи или једнак 0,85.



Слика 4.1 Карактеристичне радне тачке колоне са испуном према [20]

За $w_G < w_{G,lo}$, односно када је брзина гаса мања од брзине гаса у тачки оптерећења, се уврштавањем једначине (4.15) у једначину (4.13) добија

$$\beta_L^e = C_L \cdot \left(\frac{g \cdot \rho_L}{\mu_L} \right)^{1/6} \cdot \left(\frac{D_L}{d_h} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{w_L}{s_v} \right)^{1/3} \quad (4.18)$$

где је C_L константа која карактерише тип, облик и структуру испуне и одређује се експериментално. Вредности ове константе према литератури су дате у табели 4.2.

Сређивањем, претходна једначина постаје

$$\frac{\beta_L^e \cdot d_h}{D_L} = C_L \cdot \left(\frac{g \cdot \rho_L^2}{\mu_L^2 \cdot s_v^3} \right)^{1/6} \cdot \left(\frac{\mu_L}{D_L \cdot \rho_L} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{w_L \cdot \rho_L}{s_v \cdot \mu_L} \right)^{1/3} \cdot (d_h \cdot s_v)^{1/2} \quad (4.19)$$

Након увођења следећих бездимензионих бројева:

- $Ga = \frac{g \cdot \rho_L^2}{\mu_L^2 \cdot s_v^3}$, Галилејев број за течност;
- $Sc_L = \frac{\mu_L}{D_L \cdot \rho_L}$, Шмитов број за течност;
- $Re_L = \frac{w_L \cdot \rho_L}{s_v \cdot \mu_L}$, Рејнолдсов број за течност;
- $Sh_L = \frac{\beta_L \cdot l_{sh}}{D_L}$, Шервудов број за течност.

једначина (4.19) постаје

$$Sh_L = C_L \cdot Ga^{1/6} \cdot Sc_L^{1/2} \cdot Re_L^{1/3} \cdot (l_{sh} \cdot s_v)^{1/2} \quad (4.20)$$

односно

$$Sh_L = 2 \cdot C_L \cdot Ga^{1/6} \cdot Sc_L^{1/2} \cdot Re_L^{1/3} \cdot \varepsilon^{1/2} \quad (4.21)$$

Једначина (4.19) важи када је испуњен услов да је $w_G < w_{G,lo}$. Уколико је $w_G > w_{G,lo}$ (између тачке оптерећења и тачке загрцавања) онда важи израз

$$\beta_L^e = C_L \cdot 12^{1/2} \cdot w_{L,sr}^{1/2} \cdot \left(\frac{D_L}{d_h} \right)^{1/2} \quad (4.22)$$

где је средња брзина струјања течности дефинисана као

$$w_{L,sr} = \frac{w_L}{\varphi} \quad (4.23)$$

а акумулација течности при овим радним режимима

$$\varphi = \begin{cases} \varphi_{lo} & \text{за } w_G \leq w_{Glo} \\ \varphi_{lo} + (\varphi_{fl} - \varphi_{lo}) \cdot \left(\frac{w_G}{w_{Gfl}} \right)^{13} & \text{за } w_G > w_{Glo} \end{cases} \quad (4.24)$$

где се садржај течности у испуни у тачки загрцавања израчунава на основу израза

$$\varphi_{fl}^3 \cdot (3 \cdot \varphi_{fl} - \varepsilon) = \frac{6 \cdot \mu_L \cdot s_v^2 \cdot \varepsilon}{g \cdot \rho_L} \cdot w_{L,fl} = \frac{6 \cdot \mu_L \cdot s_v^2 \cdot \varepsilon}{g \cdot \rho_L} \cdot \frac{\dot{L}}{\dot{G}} \cdot w_{G,fl} \quad (4.25)$$

Сређивањем, једначина (4.22) постаје

$$\frac{\beta_L^e \cdot d_h}{D_L} = C_L \cdot 12^{1/2} \cdot \left(\frac{w_{L,sr} \cdot I_{Sh} \cdot \rho_L}{\mu_L} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{\mu_L}{D_L \cdot \rho_L} \right)^{1/2} \quad (4.26)$$

односно

$$Sh_L = \frac{\beta_L^e \cdot d_h}{D_L} = C_L \cdot 12^{1/2} \cdot \left(\frac{w_{L,sr} \cdot I_{Sh} \cdot \rho_L}{\mu_L} \right)^{1/2} \cdot Sc_L^{1/2} \quad (4.27)$$

4.2.2 Коefицијент прелаза супстанције у гасу

Коefицијент прелаза супстанције у гасу се рачуна према изразу,

$$Sh_G = \frac{\beta_G^e \cdot d_h}{D_G} = 2 \cdot C_G \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon - \varphi_L} \right)^{1/2} \cdot Re_G^{3/4} \cdot Sc_G^{1/3} \quad (4.28)$$

где су:

- $Re_G = \frac{w_G \cdot \rho_G}{s_v \cdot \mu_G}$, Рејнолдсов број за гас;
- $Sc_G = \frac{\mu_G}{D_G \cdot \rho_G}$, Шмитов број за гас.

4.2.3 Интензитет квашења испуне

У процедури датај у [20] треба разликовати хидраулички коefицијент квашења (ψ_h) дефинисан у одељку 4.1.1 од коefицијента квашења који подразумева однос између међуфазне површине контакта и површине испуне (ψ). Приликом прорачуна размене супстанције трреба користити коefицијент квашења који се рачуна према

$$\psi = \begin{cases} \psi_{lo} & \text{за } w_G \leq w_{Glo} \\ \psi_{lo} + (\psi_{fl} - \psi_{lo}) \cdot \left(\frac{w_G}{w_{Gfl}} \right)^{13} & \text{за } w_G > w_{Glo} \end{cases} \quad (4.29)$$

где су:

- $Re_{L\psi} = \frac{w_L \cdot d_h \cdot \rho_L}{\mu_L}$, Рејнолдсов број за коefицијент квашења;

- $Fr_{L\psi} = \frac{w_L^2}{g \cdot d_h}$, Фрудов број за коефицијент квашења;
- $We_{L\psi} = \frac{w_L^2 \cdot d_h \cdot \rho_L}{\sigma_{LG}}$, Веберов број за коефицијент квашења
- $\psi_{lo} = 1,5 \cdot (s_v \cdot d_h)^{-0,5} \cdot Re_{L\psi}^{-0,2} \cdot We_{L\psi}^{0,75} \cdot Fr_{L\psi}^{-0,45}$, коефицијент квашења у тачки оптерећења;
- $\psi_{fl} = 10,5 \cdot \left(\frac{\sigma_{LG}}{\sigma_w}\right)^{0,56} \cdot (s_v \cdot d_h)^{-0,5} \cdot Re_{L\psi}^{-0,2} \cdot We_{L\psi}^{0,75} \cdot Fr_{L\psi}^{-0,45}$, коефицијент квашења у тачки инверзије фаза.

Табела 4.2 Емпиријски коефицијенти за различите типове испуне из [20]

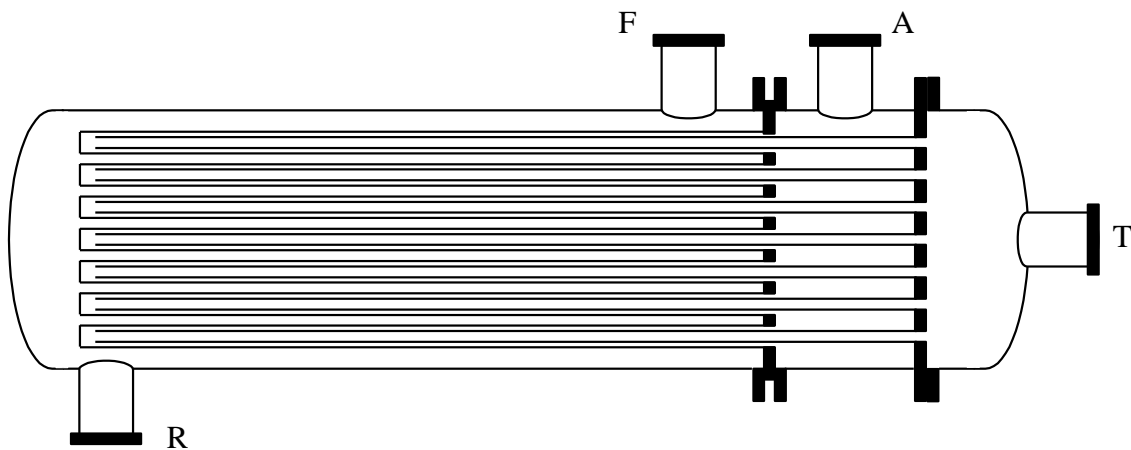
Врста испуне	Материјал	Величина	s_v	ε	C_{lo}	C_{fl}	C_h	C_p	C_L	C_G
		mm	m ² /m ³	m ³ /m ³						
Уређена испуна										
Палови прстенови	Керамика	50	155,2	0,754	3,793	3,024	1,066	0,233	1,278	0,333
Биалецки прстенови	Метал	35	176,7	0,945	-	-	0,690	0,046	1,405	0,377
Ralu pack	Метал	YC-250	250	0,945	3,178	2,558	-	0,191	1,334	0,385
Mellapack	Метал	250 Y	250	0,970	3,157	2,464	0,554	0,292	-	-
Gempak	Метал	A2T-304	202	0,977	2,986	2,099	0,678	0,344	-	-
Impulse packing	Метал	250	250	0,975	2,610	1,996	0,431	0,262	0,983	0,270
	Керамика	100	91,4	0,838	2,664	1,655	1,900	0,417	1,317	0,327
Montz packing	Метал	B1-200	200	0,979	3,116	2,339	0,547	0,355	0,971	0,390
	Метал	B1-300	300	0,930	3,098	2,464	0,482	0,295	1,165	0,422
	Пластика	C1-200	200	0,954	-	-	-	0,453	1,006	0,412
		C2-200	200	0,900	2,653	1,973	-	0,481	0,739	-
Eurpform	Пластика	PN-110	110	0,936	3,075	1,975	0,511	0,250	0,973	0,167
Неуређена (насуга) испуна										
Рашигови Супер-прстенови	Метал	0,3	315	0,960	3,560	2,340	0,750	0,76	1,500	0,450
		0,5	250	0,975	3,350	2,200	0,620	0,78	1,450	0,430
		1	160	0,980	3,491	2,200	0,750	0,500	1,290	0,440
		2	97,6	0,985	3,326	2,096	0,720	0,464	1,323	0,400
		3	80	0,982	3,260	2,100	0,620	0,430	0,850	0,300
	Пластика	2	100	0,960	3,326	2,096	0,720	0,377	1,250	0,337
Ralu flow	Пластика	1	165	0,940	3,612	2,401	0,640	0,485	1,486	0,360
		2	100	0,945	3,412	2,174	0,640	0,350	1,270	0,320
Палови прстенови	Метал	50	112,6	0,951	2,725	1,580	0,784	0,763	1,192	0,410
		35	139,4	0,965	2,629	1,679	0,644	0,967	1,012	0,341
		25	223,5	0,954	2,627	2,083	0,719	0,957	1,440	0,336
	Пластика	50	111,1	0,919	2,816	1,757	0,593	0,698	1,239	0,368
		35	151,1	0,906	2,654	1,742	0,718	0,927	0,856	0,380

Врста испуне	Материјал	Величина	s_v	ε	C_{lo}	C_{fl}	C_h	C_P	C_L	C_G
		mm	m ² /m ³	m ³ /m ³						
		25	225,0	0,887	2,696	2,064	0,528	0,865	0,905	0,446
Ралу прстенови	Метал	50	105	0,975	2,725	1,580	0,784	0,763	1,192	0,345
		38	135	0,965	2,629	1,679	0,644	1,003	1,277	0,341
		25	215	0,960	2,627	2,083	0,714	0,957	1,440	0,336
	Пластика	50	95,2	0,983	2,843	1,812	0,640	0,468	1,520	0,303
		38	150	0,930	2,843	1,812	0,640	0,672	1,320	0,333
		25	190	0,940	2,841	1,989	0,719	0,800	1,320	0,333
„NOR PAC“ прстенови	Пластика	50	86,8	0,947	2,959	1,786	0,651	0,350	1,080	0,322
		35	141,8	0,944	3,179	2,242	0,587	0,371	0,756	0,425
		25	202	0,953	3,277	2,472	0,601	0,397	0,883	0,366
		25	197,9	0,920	2,865	2,083	-	0,383	0,976	0,410
„Hiflow“ прстенови	Метал	50	92,3	0,977	2,702	1,626	0,876	0,421	1,168	0,408
		25	202,9	0,962	2,918	2,177	0,799	0,689	1,641	0,402
„Hiflow“ прстенови	Метал	50	117,1	0,925	2,894	1,871	1,038	0,327	1,478	0,345
	Пластика	50 hydr	118,4	0,925	2,894	1,871	-	0,311	1,553	0,369
		50 S	82	0,942	2,866	1,702	0,881	0,414	1,219	0,342
		25	194,5	0,918	2,841	1,989	-	0,741	1,577	0,390
	Керамика	50	89,7	0,809	2,819	1,694	-	0,538	1,377	0,379
		38	111,8	0,788	2,840	1,930	-	0,621	1,659	0,464
		20	286,2	0,758	2,875	2,410	1,167	0,628	1,744	0,465
„Glitsch“ прстенови	Метал	30 PMK	180,5	0,975	2,694	1,900	0,930	0,851	1,920	0,450
		30 P	164	0,959	2,564	1,760	0,851	1,056	1,577	0,398
„Glitsch CMR“ прстенови	Метал	1.5”	174,9	0,974	2,697	1,841	0,935	0,632	-	-
		1.5” T	188	0,972	2,790	1,870	0,870	0,627	-	-
		1.0”	232,5	0,971	2,703	1,996	1,040	0,641	-	-
		0.5”	356	0,952	2,644	2,178	-	0,882	2,038	0,495
„TOP Pak“ прстенови	Алуминијум	50	105,5	0,956	2,528	1,579	0,881	0,604	1,326	0,389
Рашигови прстенови	Керамика	50	95	0,830	2,482	1,547	-	-	1,416	0,210
		25	190	0,680	2,454	1,899	0,577	1,329	1,361	0,412
„VSP“ прстенови	Метал	50	104,6	0,980	2,806	1,689	1,135	0,773	1,222	0,420
		25	199,6	0,975	2,755	1,970	1,369	0,782	1,376	0,405
„Envi Pac“ прстенови	Пластика	80	60	0,955	2,846	1,522	0,641	0,358	1,603	0,257
		60	98,4	0,961	2,987	1,864	0,794	0,338	1,522	0,296
		32	138,9	0,936	2,944	2,012	1,039	0,549	1,517	0,459
Биалецки прстенови	Метал	50	121	0,966	2,916	1,896	0,798	0,719	1,721	0,302
		35	155	0,967	2,753	1,885	0,787	1,011	1,412	0,390
		25	210	0,956	2,521	1,856	0,692	1,891	1,461	0,331
Tellerette	Пластика	25	190	0,930	2,913	2,132	0,588	0,538	0,899	-
Hackette	Пластика	45	139,5	0,928	2,832	1,966	0,643	0,399	-	-
„Raflux“ прстенови	Пластика	15	307,9	0,894	2,825	2,400	0,491	0,595	1,913	0,370
Берлова седла	Керамика	25	260,0	0,680	-	-	0,620	-	1,246	0,387
		13	545,0	0,650	-	-	0,833	-	1,364	0,232
DIN-PAK	Пластика	70	110,7	0,938	2,970	1,912	0,991	0,378	1,527	0,326

Врста испуне	Материјал	Величина	s_v	ε	C_{lo}	C_{fl}	C_h	C_P	C_L	C_G
		mm	m ² /m ³	m ³ /m ³						
		47	131,2	0,923	2,929	1,991	1,173	0,514	1,69	0,354

5 ТОПЛОТНЕ ПЕРФОРМАНСЕ РЕКУПЕРАТОРА ТОПЛОТЕ ПОСТРОЈЕЊА ЗА ДЕГАЗАЦИЈУ ПРЕМА [24]

Рекуператор топлоте постројења за дегазацију је бајонетни размењивач топлоте (БРТ) који се састоји од две концентричне цеви од којих је спољашња цев затворена са задње стране. Цевни сноп је формиран од бајонетних цеви које су постављене у омотачу (слика 5.1). Оваква конструкција цевног снопа има предност у односу на конструкцију цевног снопа код добошастих размењивача топлоте јер омогућава независно кретања цеви у снопу чиме се елиминишу температурски напони који се јављају код класичних добошастих размењивача топлоте. Друга предност овог типа размењивача је могућност лаке демонтаже цевног снопа односно лаког чишћења.



Слика 5.1 Рекуператор топлоте са бајонетним цевима и прикључцима

У циљу димензионисања бајонетног рекуператора топлоте постављеног на експериментално постројење, у овом одељку дисертације биће изведне функционалне зависности топлотних параметара рекуператора према [24].

5.1 Номенклатура бајонетних размењивача топлоте према [24]

С обзиром на то да је у случају бајонетног размењивача топлоте могуће остварити осам различитих шема струјања флуида, пре формирања функционалних зависности топлотних параметара рекуператора потребно је увести номенклатуру којом се дефинишу токови оба флуида. Рекуператор приказан на слици 5.1 има четири прикључка који су означени словима Т, А, F и R. Улаз са стране цеви може бити кроз унутрашњу цев бајонета, а излаз кроз спољашњу (правац $T \rightarrow A$) или у супротном смеру, улазећи кроз бајонет и излазећи кроз унутрашњу цев ($A \rightarrow T$). Аналогно у омотачу постоје два могућа смера струјања: од предњег до задњег краја снопа ($F \rightarrow R$) или у супротном смеру ($R \rightarrow F$).

Да би се успоставила номенклатура бајонетних размењивача топлоте биће уведена ознака типа која се састоји од два слова. Прво слово означава улаз топлијег, а друго слово улаз хладнијег флуида. Овако формиране шеме струјања представљене су у табели 5.1.

Табела 5.1 Номенклатура бајонетних размењивача топлоте

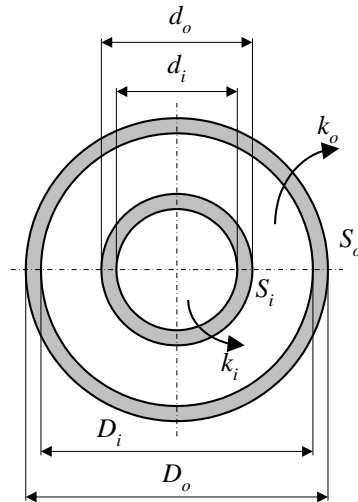
Топлији флуид са стране цеви		Хладнији флуид са стране цеви	
TF		FT	
TR		FA	
AF		RT	
AR		RA	
→ Топлији флуид		- → Хладнији флуид	

5.2 Моделирање бајонетних размењивача топлоте према [24]

У [24] разматрани су бајонетни размењивачи топлоте без промене фазе за осам различитих режима струјања. Представљена анализа заснива се на једначинама одржања масе и енергије уз поштовање следећих претпоставки:

- стационарни радни услови;
- притисак оба флуида је константан (изобарски услови);
- занемарљиви губитак топлоте у околину;
- физичка својства оба флуида су упросечена дуж површине за размену топлоте на основу чега је усвојена константна вредност коефицијента пролаза топлоте;
- примењен је клипни модел струјања оба флуида.

Пресек бајонетне цеви са карактеристичним величинама приказан је слици 5.2. Спољашња површина унутрашње цеви $S_i = d_o \cdot \pi \cdot L_T \cdot N_T$ и спољашња површина спољашње цеви $S_o = D_o \cdot \pi \cdot L_T \cdot N_T$ су такође представљени на истој слици. Референтна површина за коефицијент прелаза топлоте за унутрашњу (k_i) и спољашњу цев (k_o) је спољашња површина цеви.



Слика 5.2 Пресек цеви рекуператора са карактеристичним величинама

Параметри које су коришћени за дефинисање функционалних зависности топлотних перформанси бајонетног рекуператора приказани су у табели 5.2.

Табела 5.2 Параметри топлотних перформанси рекуператора

Параметар	Израз
Однос топлотних еквивалената	$R = \frac{\dot{m}_2 \cdot c_{p2}}{\dot{m}_1 \cdot c_{p1}} = \frac{t_{1in} - t_{1out}}{t_{2out} - t_{2in}}$
Топлотна ефикасност	$P = \frac{t_{2out} - t_{2in}}{t_{1in} - t_{2in}}$
Број јединица преноса за топлији флуид	$NTU_1 = \frac{k_o \cdot S_o}{\dot{m}_1 \cdot c_{p1}}$
Број јединица преноса за хладнији флуид	$NTU_2 = \frac{k_o \cdot S_o}{\dot{m}_2 \cdot c_{p2}}$
Однос спољашњих површина унутрашње и спољашње цеви	$\Psi_s = \frac{S_i}{S_o}$
Однос коефицијената прелаза топлоте	$\Psi_k = \frac{k_o}{k_i}$
Бездимензиони параметар	$Z = \frac{\Psi_s}{\Psi_k} = \frac{S_i \cdot k_i}{S_o \cdot k_o}$
Помоћна функција	$D = D(Z, R)$

Топлотна снага бајонетног рекуператора је

$$\dot{Q} = k_o \cdot S_o \cdot \Delta t_{sr} \quad (5.1)$$

где је \dot{Q} (W) топлотна снага, k_o (W/(m²·K)) коефицијент прелаза топлоте и Δt_{sr} (°C) средња температурска разлика.

Средња температурска разлика дефинисана је изразом

$$\Delta t_{sr} = \varepsilon \cdot \Delta t_{ln} \quad (5.2)$$

где је ε корекциони фактор и Δt_{ln} (°C) је средња логаритамска температурска разлика дефинисана као

$$\Delta t_{ln} = \frac{(t_{1p} - t_{2k}) - (t_{1k} - t_{2p})}{\ln \left(\frac{t_{1p} - t_{2k}}{t_{1k} - t_{2p}} \right)} \quad (5.3)$$

где су:

- t_{1p} , °C, температура топлијег флуида на улазу у рекуператор;
- t_{1k} , °C, температура топлијег флуида на излазу из рекуператора;
- t_{2p} , °C, температура хладнијег флуида на улазу у рекуператор;
- t_{2k} , °C, температура хладнијег флуида на излазу из рекуператор.

У случају размењивача топлоте с произвољном шемом струјања корекциони фактор је

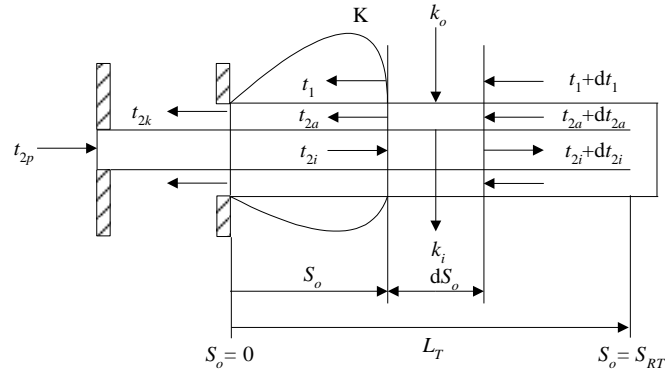
$$\varepsilon = \begin{cases} \frac{\ln \frac{1-P}{1-R \cdot P}}{NTU_2 \cdot (R-1)} & \text{for } R \neq 1 \\ \frac{P}{NTU_2 \cdot (1-P)} & \text{for } R = 1 \end{cases} \quad (5.4)$$

док је веза између броја јединица преноса за топлији и хладнији флуид дефинисана као

$$NTU_2 = \frac{NTU_1}{R} \quad (5.5)$$

Топлотне перформансе сваког размењивача топлоте при стационарним радним условима су познате када је позната функционална веза између параметара R , P и NTU_2 . У дисертацији је детаљно описан поступак формирања ове зависности за RT, док су за остале шеме струјања приказани само крајњи резултати.

Након формирања топлотног биланса за инфинитезималну површину за размену топлоте приказане на слици 5.3, добијају се једначине



Слика 5.3 Површина за размену топлоте бајонетног рекуператора

$$\dot{m}_2 \cdot c_{p2} \cdot (t_{2i} + dt_{2i}) = \dot{m}_2 \cdot c_{p2} \cdot t_{2i} + k_i \cdot (t_{2a} - t_{2i}) \cdot dS \quad (5.6)$$

$$\dot{m}_2 \cdot c_{p2} \cdot (t_{2a} + dt_{2a}) + k_o \cdot (t_1 - t_{2a}) \cdot dS_o = \dot{m}_2 \cdot c_{p2} \cdot t_{2a} + k_i \cdot (t_{2a} - t_{2i}) \cdot dS_i \quad (5.7)$$

$$\dot{m}_1 \cdot c_{p1} \cdot t_1 + k_o \cdot (t_1 - t_{2a}) \cdot dS_o = \dot{m}_1 \cdot c_{p1} \cdot (t_1 + dt_1) \quad (5.8)$$

које се после сређивања трансформишу у следећи систем диференцијалних једначина

$$\frac{dt_{2i}}{dS_o} = \frac{k_o \cdot Z}{\dot{m}_2 \cdot c_{p2}} \cdot (t_{2a} - t_{2i}) \quad (5.9)$$

$$\frac{dt_{2a}}{dS_o} = -\frac{k_o}{\dot{m}_2 \cdot c_{p2}} \cdot (t_1 - t_{2a}) + \frac{k_o \cdot Z}{\dot{m}_2 \cdot c_{p2}} \cdot (t_{2a} - t_{2i}) \quad (5.10)$$

$$\frac{dt_1}{dS_o} = \frac{k_o \cdot R}{\dot{m}_2 \cdot c_{p2}} \cdot (t_1 - t_{2a}) \quad (5.11)$$

са граничним условима

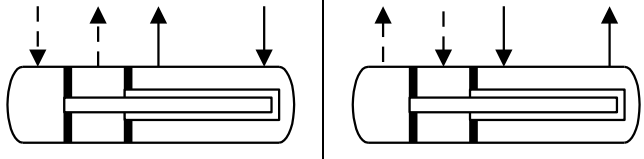
$$S_o = 0 \rightarrow t_1 = t_{1k} \quad (5.12)$$

$$S_o = S_{HE} \rightarrow t_1 = t_{1p} \quad (5.13)$$

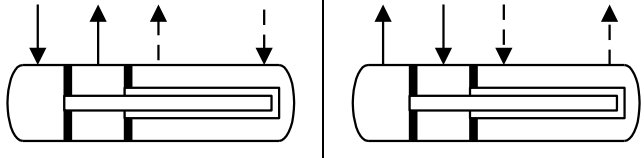
После решавања система једначина (5.9) – (5.11) заједно са топлотним билансом по контури К добијају се функционалне зависности између параметара R , P , NTU_2 и Z које су приказане у табелама 5.3 – 5.6 за све шеме струјања топлијег и хладнијег флуида.

У табелама је приказан и параметар топлотне ефикасности за теоријски случај бесконачне површине за размену топлоте P_{max} .

Табела 5.3 Топлотне перформансе шеме струјања RT и FA

RT FA		<p>→ Топлији флуид</p> <p>- -> Хладнији флуид</p>
D	$\sqrt{1 + \frac{4 \cdot Z}{(R+1)^2}}$	
NTU_2	$\frac{1}{(R+1) \cdot D} \cdot \ln \frac{2 + P \cdot (D-1) \cdot (R+1)}{2 - P \cdot (D+1) \cdot (R+1)}$	
P	$\frac{2 - 2 \cdot \exp(-NTU_2 \cdot D \cdot (R+1))}{\exp(-NTU_2 \cdot D \cdot (R+1)) \cdot (D-1) \cdot (R+1) + (D+1) \cdot (R+1)}$	
P_{max}	$\frac{2}{(D+1) \cdot (R+1)}$	

Табела 5.4 Топлотне перформансе шеме струјања TR и AF

TR AF		<p>→ Топлији флуид</p> <p>- -> Хладнији флуид</p>
D	$\sqrt{\frac{(R+1)^2}{R^2} + 4 \cdot Z}$	
NTU_2	$\frac{1}{R \cdot D} \cdot \ln \frac{2 + P \cdot (D \cdot R - R - 1)}{2 - P \cdot (D \cdot R + R + 1)}$	
P	$\frac{2 - 2 \cdot \exp(-NTU_2 \cdot D \cdot R)}{\exp(-NTU_2 \cdot D \cdot R) \cdot (D \cdot R - R - 1) + D \cdot R + R + 1}$	
P_{max}	$\frac{2}{D \cdot R + R + 1}$	

Табела 5.5 Топлотне перформансе шеме струјања RA и FT

<p>RA FT</p>	<p>→ Топлији флуид - → Хладнији флуид</p>
D	$\sqrt{1 + \frac{4 \cdot Z}{(R-1)^2}} \quad R \neq 1$
NTU_2	$\begin{cases} \frac{1}{(R-1) \cdot D} \cdot \ln \frac{2-2 \cdot P + P \cdot (D-1) \cdot (R-1)}{2-2 \cdot P - P \cdot (D+1) \cdot (R-1)} & R \neq 1 \\ \frac{1}{2 \cdot \sqrt{Z}} \cdot \ln \left[-\frac{(P \cdot \sqrt{Z} - P + 1)}{P \cdot \sqrt{Z} + P - 1} \right] & R = 1 \end{cases}$
P	$\begin{cases} \frac{2-2 \cdot \exp(-NTU_2 \cdot D \cdot (R-1))}{\exp(-NTU_2 \cdot D \cdot (R-1)) \cdot ((D-1) \cdot (R-1) - 2) + (D+1) \cdot (R-1) + 2} & R \neq 1 \\ \frac{\exp(2 \cdot NTU_2 \cdot \sqrt{Z}) - 1}{\exp(2 \cdot NTU_2 \cdot \sqrt{Z}) + \sqrt{Z} \cdot \exp(2 \cdot NTU_2 \cdot \sqrt{Z}) + \sqrt{Z} - 1} & R = 1 \end{cases}$
P_{max}	$\begin{cases} \frac{2}{2 + (D+1) \cdot (R-1)} & R > 1 \\ \frac{2}{2 - (D-1) \cdot (R-1)} & R < 1 \\ \frac{1}{1 + \sqrt{Z}} & R = 1 \end{cases}$

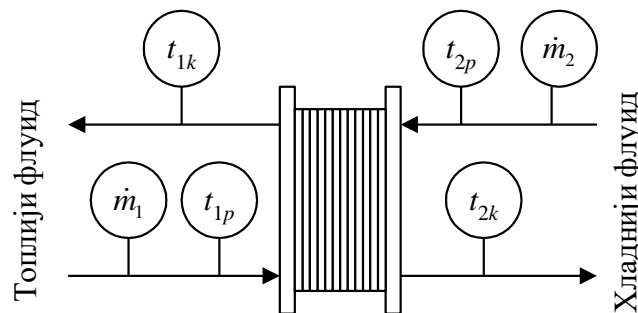
Табела 5.4 Топлотне перформансе шеме струјања TF и AR

<p>TF AR</p>	<p>→ Топлији флуид - → Хладнији флуид</p>
D	$\sqrt{\frac{(R-1)^2}{R^2} + 4 \cdot Z}$
NTU_2	$\frac{1}{R \cdot D} \cdot \ln \frac{2 + P \cdot (D \cdot R - R - 1)}{2 - P \cdot (D \cdot R + R + 1)}$
P	$\frac{2 - 2 \cdot \exp(-NTU_2 \cdot R \cdot D)}{\exp(-NTU_2 \cdot R \cdot D) \cdot (D \cdot R - R - 1) + D \cdot R + R + 1}$
P_{max}	$\frac{2}{D \cdot R + R + 1}$

5.2.1 Методологија мерења топлотних перформанси и запрљања плочастог загрејача улазне воде PRT-103 према [22]

У зимском периоду рада постројења за дегазацију превиђено је да се улазна вода загрева помоћу вреле воде у плочастом размењивачу топлоте PRT-103 како је приказано на слици 3.1. У том случају могуће је континуално пратити промену топлотних перформанси и запрљање плочастог загрејача PRT-103 како је представљено у [22] и на основу тога планирати ремонт односно чишћење загрејача. Величине које је потребно мерити су:

- \dot{m}_1 , kg/s, проток топлијег флуида;
- \dot{m}_2 , kg/s, проток хладнијег флуида;
- t_{1p} , °C, температура топлијег флуида на улазу у загрејач;
- t_{1k} , °C, температура топлијег флуида на излазу из загрејача;
- t_{2p} , °C, температура хладнијег флуида на улазу у загрејач;
- t_{2k} , °C, температура хладнијег флуида на излазу из загрејача.



Слика 5.4 Мерне позиције плочастог загрејача PRT-103

За сваку измерену радну тачку плочастог загрејача воде топлотна снага са стране топлијег флуида је

$$Q_1 = \dot{m}_1 \cdot c_{p1} \cdot (t_{1p} - t_{1k}) \quad (5.14)$$

а са стране хладнијег

$$Q_2 = \dot{m}_2 \cdot c_{p2} \cdot (t_{2k} - t_{2p}) \quad (5.15)$$

Средња вредност измерене топлотне снаге је

$$Q_m = \frac{Q_1 + Q_2}{2} \quad (5.16)$$

где су c_{p1} и c_{p2} , [J/kg · K], специфични топлотни капацитети топлијег и хладнијег флуида.

За сваки радни режим, стационарност радног режима се може проценити помоћу израза

$$\Delta_{St} = \frac{s_Q}{Q_m} = \frac{\sqrt{(Q_1 - Q_m)^2 + (Q_2 - Q_m)^2}}{Q_m} \quad (5.17)$$

Према томе топлотна снага загрејача топлоте се дефинише као $Q_m \pm s_Q$. У инжењерској пракси прихватљива дисперзија топлотне снаге се креће у границама од 3 до 7%, у одређеним случајевима чак и до 10%.

С обзиром да је загрејач са супротносмерним током, средња температурска разлика је

$$\Delta t_{sr} = \frac{(t_{1p} - t_{2k}) - (t_{1k} - t_{2p})}{\ln \frac{t_{1p} - t_{2k}}{t_{1k} - t_{2p}}} \quad (5.18)$$

па је коефицијент прелаза топлоте

$$k = \frac{Q_m}{S_{RT} \cdot \Delta t_{sr}} \quad (5.19)$$

где је S_{RT} [m²], површина за размену топлоте.

Коефицијент прелаза топлоте за раван зид се израчунава као

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + R_1 + \frac{\delta_z}{\lambda_z} + \frac{1}{\alpha_2} + R_2 \quad (5.20)$$

где су:

- α_1 and α_2 , W/m² · K, коефицијенти прелаза топлоте са стране топлијег и хладнијег флуида;
- R_1 and R_2 , m² · K/W, задрљања са стране топлијег и хладнијег флуида;
- δ_z , m, дебљина плоче;
- λ_z , W/m · K, топлотна проводност материјала плоче.

Коефицијент прелаза топлоте у случају плочастог размењивача се може израчунати помоћу корелације

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d_h}{\lambda} = a \cdot Re^b \cdot Pr^c \quad (5.21)$$

где су Re и Pr Рејнолдсов и Прантлов број, а a је параметар. У случају турбулентног струјања, према аналогiji Чилтон - Колбурна (Chilton – Colburn), параметар c једнак је 1/3, док се параметар b креће у опсегу од 0,6 – 0,8 [22].

У случају струјног канала правоугаоног попречног пресека димензија $W \times \delta$ хидраулички пречник једнак је

$$d_h = \frac{4 \cdot W \cdot \delta}{2 \cdot (W + \delta)} = \frac{2 \cdot \delta}{1 + \frac{\delta}{W}} \quad (5.22)$$

где је W [m] ширина струјног канала и δ [m] растојање између плоча.

У случају уског струјног канала код кога важи $W \gg \delta$, хидраулички пречник се своди на

$$d_h \approx 2 \cdot \delta \quad (5.23)$$

Рејнолдсов број је

$$Re = \frac{w \cdot d_h \cdot \rho}{\mu} \quad (5.24)$$

па се заменом (5.23) у (5.24) добија

$$\text{Re} = \frac{2 \cdot \dot{m}}{W \cdot \mu} \quad (5.25)$$

Заменом (5.25) у једначину (5.21) добија се израз за коефицијент прелаза топлоте

$$\alpha = \frac{\lambda}{2 \cdot \delta} \cdot a \cdot \left(\frac{2 \cdot \dot{m}}{W \cdot \mu} \right)^b \cdot \text{Pr}^{1/3} \quad (5.26)$$

где су:

- w , m/s, брзина струјања воде;
- \dot{m} , kg/s, проток воде;
- λ , W/m · K, топлотна проводност воде;
- μ , Pa · s, динамичка проводност воде.

С обзиром на то да је геометрија струјног канала за оба флуида једнака, заменом (5.26) у (5.20), поштујући номенклатуру коефицијената прелаза топлоте са стране топлијег и са стране хладнијег флуида, добија се

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\frac{\lambda_1}{2 \cdot \delta} \cdot a \cdot \left(\frac{2 \cdot \dot{m}_1}{W \cdot \mu_1} \right)^b \cdot \text{Pr}_1^{1/3}} + \frac{1}{\frac{\lambda_2}{2 \cdot \delta} \cdot a \cdot \left(\frac{2 \cdot \dot{m}_2}{W \cdot \mu_2} \right)^b \cdot \text{Pr}_2^{1/3}} + R_1 + \frac{\delta_z}{\lambda_z} + R_2 \quad (5.27)$$

Након груписања чланова, једначина (5.27) постаје

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{A \cdot \dot{m}_1^b \cdot \frac{\lambda_1 \cdot \text{Pr}_1^{1/3}}{\mu_1^b}} + \frac{1}{A \cdot \dot{m}_2^b \cdot \frac{\lambda_2 \cdot \text{Pr}_2^{1/3}}{\mu_2^b}} + R_1 + \frac{\delta_z}{\lambda_z} + R_2 \quad (5.28)$$

односно

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{A \cdot B_1 \cdot \left(\frac{\dot{m}_1}{\mu_1} \right)^{0.65}} + \frac{1}{A \cdot B_2 \cdot \left(\frac{\dot{m}_2}{\mu_2} \right)^{0.65}} + \frac{\delta_{pl}}{\lambda_{pl}} + R_{tot} \quad (5.29)$$

Параметар A константа која се израчунава као

$$A = \frac{a}{2^{1-b} \cdot \delta \cdot W^b} \quad (5.29)$$

док параметар B узима у обзир промену својстава радних флуида са температуром

$$B = \lambda \cdot \text{Pr}^{1/3} \quad (5.30)$$

Параметар R_{tot} представља суму запрљања са стране топлијег и хладнијег флуида

$$R_{tot} = R_1 + R_2 \quad (5.31)$$

С обзиром на чињеницу да у општем случају геометрија плочастог загрејача није позната, коефицијент пролаза топлоте је функција више параметара

$$k = f(\dot{m}_1, \dot{m}_2, A, b, B_1, B_2, R_{tot}) \quad (5.32)$$

где су \dot{m}_1 и \dot{m}_2 мерени протоци топлијег и хладнијег флуида, B_1 и B_2 се израчунавају за сваку радну тачку.

На основу изложене методологије, која је представљена у [22], и коришћењем метода регресионе анализе, могуће је израчунати укупно запрљање загрејача R_{tot} и на основу тога проценити промену перформанси у току одређеног периода рада.

6 МОДЕЛИРАЊЕ ТРАНСПОРТА СУПСТАНЦИЈЕ У ВАКУУМСКИМ ДЕГАЗАТОРИМА СА НАСУТОМ ИСПУНОМ

Поступак десорпције кисеоника из напојне воде (вакуумска деоксигенација) је базиран на Хенријевом закону растворљивости гасова у течности према коме је количина гаса која је растворена у течној фази директно пропорционална апсолутном притиску деоксигенација. Ефикасност поступка се остварује повећањем контактне површине фаза у контакту, загревањем воде на улазу у колону као и променом количине гаса за одвијање операција (у конкретном случају коришћен је азот).

Операција деоксигенације напојне воде се, у општем случају, одвија у вишеккомпонентном систему гас - течност. Компоненте које чине систем у коме се врши транспорт супстанције су:

- ваздух;
- вода односно водена пара;
- азот.

Прецизније дефинисано, суви ваздух, на стандардним условима односно на температури $t = 0^{\circ}\text{C}$ и притиску $p_t = 101325 \text{ Pa}$, је мешавина 10 компонената. У случају ваздуха односно мешавине идеалних гасова, молски удели компонената су једнаки запреминским и дати су у табели 5.1.

Табела 6.1 Састав сувог ваздуха на стандардним условима

Компонента	Ознака	%vol
Азот	N_2	78,084
Кисеоник	O_2	20,947
Аргон	Ar	0,934
Угљен-диоксид	CO_2	0,031
Неон	Ne	0,001
Метан	CH_4	0,0002
Хелијум	He	0,0005
Криптон	Kr	0,0001
Водоник	H_2	0,00005
Ксенон	Xe	0,00000087

Из претходне табеле се види да су две доминантне компоненте у ваздуху азот и кисеоник. Посматрајући остале компоненте са аспекта транспорта супстанције, може се закључити да је њихов утицај на одвијање процеса транспорта супстанције миноран, односно да парцијални притисци компонената немају значајан утицај на укупни притисак у систему и да је количина ових компонената у води је занемарљиво ниска.

Претходном анализом оправдана је претпоставка коришћена у току моделирања процеса односно претпоставка да је ваздух двокомпонентна мешавина гасова. Према томе, процес транспорта супстанције се своди на трокомпонентни систем који чине компоненте:

- кисеоник (компонента А);
- вода и водена пара (компонента В);
- азот (компонента С).

Физички, компоненте мешавине које се транспортују између течне и гасне фазе су кисеоник (А) и азот (С). Њихов међусобни утицај на одвијање транспорта супстанције

се може детаљније проучити анализом Хенријевог закона равнотеже у систему гас - течност, који за i – ту компоненту гласи,

$$x_i^* = \frac{P_i^*}{H_i} \quad (6.1)$$

где су:

- x_i^* , mol(i) / mol(A+B+C), равнотежни молски удео компоненте i у течности;
- P_i^* , Pa, равнотежни парцијални притисак i – те компоненте у гасу;
- H_i , Pa / mol(i) / mol(A+B+C), Хенријева константа i – те компоненте у гасу.

Поређењем низа вредности преузетих из [14], може се закључити да, генерално гледано, Хенријева константа за кисеоник има око два пута вишу вредност од Хенријево константе за азот.

Коначно, из једначине (5.1), као и из односа равнотежних молских удела компонената А и С у односу на компоненту В, доноси се закључак да је садржај компонената у течности такав да се међусобни утицај на одвијање операције, практично, може занемарити односно да је оправдано моделирање процеса у коме се посматра транспорт само кисеоника А из течности у гас.

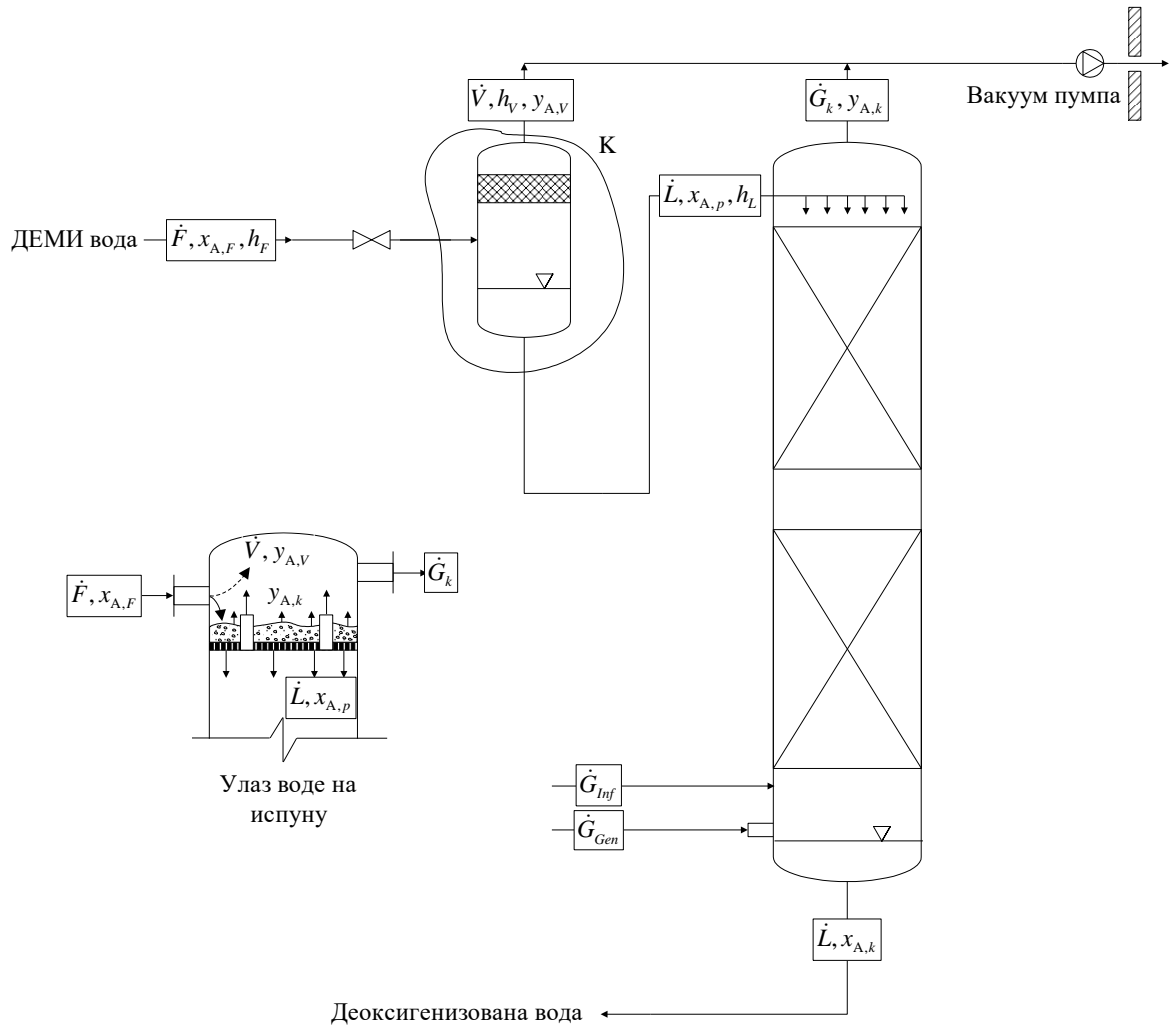
6.1 Улазне величине

Пре постављања једначина биланса за колону, потребно је дефинисати улазне величине односно саставе и стања гасне и течне фазе на улазу у колону. У питању су:

- \dot{L} , mol/s, проток воде на улазу у колону;
- $x_{A,p}$, mol(A)/mol(A+B+C), молски удео кисеоника у води на улазу у колону;
- \dot{G}_{Gen} , mol/s, проток гаса из генератора азота;
- \dot{G}_{Inf} , mol/s, проток инфилтрираног ваздуха;

6.1.1 Улаз воде

Приликом уласка течности у колону долази до њеног пригушивања, при чему се значајно смањује количина кисеоника у води на врху испуне. Упрошћена шема процеса са улазним и излазним величинама приказана је на слици 6.1. На слици је приказан и сепаратор који симулира процес пригушивања воде.



Слика 6.1 Улазне и излазне величине колоне

У случају пригушивања напојне воде, у циљу добијања протока и састава течне и гасне фазе на излазу из сепаратора, поставићемо једначине биланса за контуру К (слика 6.1),

$$\dot{F} = \dot{V} + \dot{L} \quad (6.2)$$

$$\dot{F} \cdot x_{A,F} = \dot{V} \cdot y_{A,V} + \dot{L} \cdot x_{A,p} \quad (6.3)$$

$$\dot{F} \cdot h_F(p_F, t_F) = \dot{V} \cdot h_V(p_D, t_D) + \dot{L} \cdot h_L(p_D, t_D) \quad (6.4)$$

где су:

- \dot{F} , mol/s, проток ДЕМИ воде;
- \dot{V} , mol/s, проток гасне фазе на излазу из сепаратора;
- \dot{L} , mol/s, проток течне фазе на улазу у колону (излаз течности из сепаратора);
- p_F , Ра, притисак ДЕМИ воде;
- p_D , Ра, притисак деоксигенације;
- t_F , °С, температура ДЕМИ воде;
- t_D , °С, температура деоксигенације;
- $x_{A,F}$, kmolA/kmol(A+B+C), молски удео кисеоника у ДЕМИ води;

- $y_{A,V}$, kmolA/kmol(A+B+C), молски удео кисеоника у праној фази на излазу из сепаратора;
- $x_{A,p}$, kmolA/kmol(A+B+C), молски удео кисеоника у води на улазу у колону (излаз течности из сепаратора);
- $h_F(p_F, t_F)$, J/mol, молска енталпије ДЕМИ воде;
- $h_V(p_D, t_D)$, J/mol, молска енталпија гасне фазе на излазу из сепаратора;
- $h_L(p_D, t_D)$, J/mol, молска енталпија воде на улазу у колону (излаз течности из сепаратора).

У случају испуњености услова

$$t_D < t_{kond.}(p_D) \quad (6.5)$$

где су:

- t_D , °C, температура течности у колони;
- $t_{kond.}$, °C, равнотежна температура течности на притиску деоксигенације p_D ;

неће доћи до испаравања воде при пригушивању, што се позитивно одражава на снагу електромотора вакуум пумпе односно потрошњу електричне енергије, с обзиром на чињеницу да се у овом случају пумпа не оптерећује додатном количином паре.

Да би одредили удео кисоника пре сепаратора, биће усвојена реална претпоставка да је ДЕМИ вода у равнотежи са околним ваздухом, па је садржај кисоника испред сепаратора дефинисан законом Хенрија (6.1).

С обзиром да је реч о идеалној мешавини гасова, једначина стања идеалног гаса за мешавину која гласи

$$p_D \cdot \dot{V}_m = \dot{G}_m \cdot R \cdot T \quad (6.6)$$

се такође може поставити за сваку од компонената

$$p_i \cdot \dot{V}_m = \dot{G}_i \cdot R \cdot T \quad (6.7)$$

где су:

- R , J/mol K, универзална гасна константа;
- T , K, апсолутна температура гаса;
- \dot{G}_m , mol/s, проток гасне мешавине;
- \dot{G}_i , mol/s, проток i -те компоненте у мешавини.

Дељењем једначине (6.7) са једначином (6.6) добија се израз за молски удео компоненте у гасу

$$\frac{p_i}{p_D} = \frac{\dot{G}_i}{\dot{G}_m} = y_i \quad (6.8)$$

Из (6.8) следи израз за одређивање парцијалног притиска кисеоника у гасној фази

$$p_A = y_A \cdot p_F \quad (6.9)$$

где су:

- \dot{V}_m , m³/s, запремински проток гаса;

- p_A , Pa, парцијални притисак кисеоника у околној атмосфери;
- y_A , kmolA/kmol(A+C), молски удео кисеоника у околној атмосфери;
- p_F , Pa, притисак напојне воде (атмосферски притисак).

Уврштавањем једначине (6.9) у једначину (6.1) добија се израз за молски удео кисеоника у ДЕМИ води испред сепаратора

$$x_{A,F} = y_A \cdot \frac{p_b}{H_A(p_b, t_F)} \quad (6.10)$$

којим је дефинисана максимална количина кисеоника у ДЕМИ води на атмосферском притиску.

где су:

- H_A , Pa/[molA/mol(A+B)], Хенријева константа за кисеоник која зависи од притиска и температуре;
- p_b , Pa, атмосферски притисак.

Треба напоменути да приликом транспорта воде пумпом, не долази до промене количине кисоника у води, чиме је оправдан атмосферски притисак у једначини (6.10).

Такође, аналогно претходно описаној процедури, одређујемо молски удео кисеоника у води на притиску и теperaturи деоксигенације

$$x_{A,p} = y_A \cdot \frac{p_D}{H_A(p_D, t_D)} \quad (6.11)$$

Једначина (6.11) дефинише теоријски максималну количину кисеоника у течности на врху испуне.

Из претходних једначине може се видети да је Хенријева константа (а такође и остала физичка својства флуида) функција како притиска тако и температуре. Одређивање температуре воде на притиску деоксигенације врши се итеративним решавањем једначина (6.2) – (6.4).

Претходном анализом је извршено потпуно дефинисање параметара воде на улазу у колону односно течности која долази на испуну.

6.1.2 Улаз гаса

Гасна фаза за обављање операције генерише се из два извора:

- ваздух који је последица инфилтрације - услед вакуума у систему ваздух продире кроз пукотине и недовољно заптивене спојеве
- азот који се доводи из засебне јединице (генератор азота, у даљем тексту генерисани азот).

Укупни проток инфилтрираног ваздуха се може свести на кисеоник и азот

$$\dot{\tilde{G}}_{Inf} = \dot{\tilde{G}}_{C,Inf} + \dot{\tilde{G}}_{A,Inf} \quad (6.12)$$

где су:

- $\dot{\tilde{G}}_{Inf}$, kg/s, укупни проток инфилтрираног ваздуха;
- $\dot{\tilde{G}}_{C,Inf}$, kg/s, проток инфилтрираног азота;

- $\dot{\tilde{G}}_{A,Inf}$, kg/s, прток инфилтрираног кисеоника.

У зависности од типа генератора азота, генерисани гас, поред већинског процента азота садржи и одређени проценат кисеоника, па је, сходно томе, укупни прток генерисаног гаса једнак

$$\dot{\tilde{G}}_{Gen} = \dot{\tilde{G}}_{C,Gen} + \dot{\tilde{G}}_{A,Gen} \quad (6.13)$$

где су:

- $\dot{\tilde{G}}_{Gen}$, kg/s, укупни прток генерисаног гаса;
- $\dot{\tilde{G}}_{C,Gen}$, kg/s, прток азота из генератора;
- $\dot{\tilde{G}}_{A,Gen}$, kg/s, прток кисеоника из генератора азота.

С обзиром на то да је пре пуштања постројења у погон, извршено мерење инфилтрације, на основу чега је израчунат укупни прток инфилтрираног ваздуха, могуће је израчунати укупни молски прток кисеоника на улазу у колону

$$\dot{G}_{A,p} = \dot{G}_{A,Inf} + \dot{G}_{A,Gen} = y_A \cdot \frac{\dot{\tilde{G}}_{Inf}}{M_A} + y_{A,Gen} \cdot \frac{\dot{\tilde{G}}_{Gen}}{M_A} \quad (6.14)$$

где су:

- $\dot{G}_{A,Inf}$, mol/s, прток кисоника из инфилтрираног ваздуха;
- $\dot{G}_{A,Gen}$, mol/s, прток кисеоника из генератора;
- $y_{A,Gen}$, kmolA/kmol(A+C), молски удео кисоника у азоту из генератора;
- M_A , kg/mol, моларна маса кисеоника.

Аналогно (6.14), укупни молски прток азота на улазу у колону је

$$\dot{G}_{C,p} = \dot{G}_{C,Inf} + \dot{G}_{C,Gen} = (1 - y_A) \cdot \frac{\dot{\tilde{G}}_{Inf}}{M_C} + (1 - y_{A,Gen}) \cdot \frac{\dot{\tilde{G}}_{Gen}}{M_C} \quad (6.15)$$

где су:

- $\dot{G}_{C,Inf}$, mol/s, прток азота из инфилтрираног ваздуха;
- $\dot{G}_{C,Gen}$, mol/s, прток азота из генератора;
- M_C , kg/mol, моларна маса азота.

6.1.3 Прток водене паре кроз испуну

Притисак на коме се одвија деоксигенација је, према закону Далтона, једнак суми парцијалних притисак компоненти у гасу

$$P_D = P_A + P_B + P_C \quad (6.16)$$

где су:

- p_A , Pa, парцијални притисак кисеоника у гасној фази;
- p_B , Pa, парцијални притисак водене паре у гасној фази;

- p_c , P_a , парцијални притисак азота у гасној фази.

Дељењем једначине (6.16) са притиском на коме се одвија деоксигенације p_D и заменом израза (6.8) добија се

$$\frac{\dot{G}_A}{\dot{G}_A + \dot{G}_B + \dot{G}_C} + \frac{\dot{G}_C}{\dot{G}_A + \dot{G}_B + \dot{G}_C} + \frac{p_B}{p_D} = 1 \quad (6.17)$$

где су:

- \dot{G}_A , mol/s, проток кисеоника кроз колону;
- \dot{G}_B , mol/s, проток водене паре кроз колону;
- \dot{G}_C , mol/s, проток азота кроз колону.

Притисак водене паре p_B је могуће изразити преко дефиниције релативне влажности гаса RV

$$p_B = RV \cdot p_B^*(t_D) \quad (6.18)$$

где је $p_B^*(t_D)$, P_a , притисак засићења водене паре на температури деоксигенације t_D .

Заменом дефиниције релативне влажности гаса (6.18) у једначину (6.17), добија се израз којим је дефинисан молски проток водене паре у гасној мешавини у колони

$$\dot{G}_B = \frac{RV \cdot p_B^*(t_D)}{p_D - RV \cdot p_B^*(t_D)} \cdot (\dot{G}_A + \dot{G}_C) \quad (6.19)$$

У изведеном моделу, усвојена је претпоставка да је релативна влажност 100%. У пракси проток воде је много већи од протока паре, па је оправдана претпоставка да ће гас бити засићен воденом паром. Такође, битно је да се напомене, да се увођењем релативне влажности гасне фазе формира још један степен слободе модела процеса деоксигенације.

6.2 Својства воде и водене паре под вакуумом

Својства (осим вискозности) воде и водене паре су за дефинисане услове израчуната на основу процедуре дате у [15]. Процедура је валидна како за услове засићења тако и за остала стања. Једначине важе за област притисака 0,1 - 100barA.

6.2.1 Енталпија

Специфична енталпија у kJ/kmol воде је

$$h_L = h_{RL} \cdot R \cdot T_B \quad (6.20)$$

где су:

- $T_B = 100$, K;
- h_{RL} , редукована енталпија воде једнака

$$h_{RL} = h_{RL0} + b_1 \cdot (T_R - T_{R0}) + \frac{b_2}{2} \cdot (T_R^2 - T_{R0}^2) + \frac{b_3}{3} \cdot (T_R^3 - T_{R0}^3) + \frac{a_2}{2} \cdot (p_R^2 - p_{R0}^2) + (a_1 - a_4 \cdot T) \cdot (p_R - p_{R0}) \quad (6.21)$$

а водене паре

$$h_G = h_{RG} \cdot R \cdot T_B \quad (6.22)$$

где је:

- h_{RG} , редукована енталпија водене паре једнака

$$h_{RG} = h_{RG0} + \Delta h_{RG1}(T_R) + \Delta h_{RG2}(T_R, p_R) \quad (6.23)$$

$$\Delta h_{RG1}(T_R) = d_1 \cdot (T_R - T_{R0}) + \frac{d_2}{2} \cdot (T_R^2 - T_{R0}^2) + \frac{d_3}{3} \cdot (T_R^3 - T_{R0}^3) \quad (6.24)$$

$$\Delta h_{RG2}(T_R, p_R) = c_1 \cdot (p_R - p_{R0}) + 4 \cdot c_2 \cdot \left(\frac{p_R}{T_R^3} - \frac{p_{R0}}{T_{R0}^3} \right) + 12 \cdot c_3 \cdot \left(\frac{p_R}{T_R^{11}} - \frac{p_{R0}}{T_{R0}^{11}} \right) + 4 \cdot c_4 \cdot \left(\frac{p_R^3}{T_R^{11}} - \frac{p_{R0}^3}{T_{R0}^{11}} \right) \quad (6.25)$$

где су:

- $T_R = T/T_B$, редукована температура;
- T , К, апсолутна температура;
- T_{R0} , К, редукована апсолутна температура на референтним условима;
- $p_R = p/p_B$, редуковани притисак;
- p , Ра, апсолутни притисак;
- p_{R0} , К, редуковани апсолутни притисак на референтним условима;

6.2.2 Густина

Молска густина једнака је реципрочној вредности специфичне молске запремине

$$\rho_L = \frac{1}{v_L} \quad (6.26)$$

Специфична запремина воде у m^3/kmol је дефинисана изразом

$$v_L = \frac{v_{RL} \cdot R \cdot T_B}{p_B} \quad (6.27)$$

где је:

- v_{RL} , редукована специфична запремина течности

$$v_{RL} = a_1 + a_2 \cdot p_R + a_3 \cdot T_R + a_4 \cdot T_R^2 \quad (6.28)$$

а водене паре

$$v_G = \frac{v_{RG} \cdot R \cdot T_B}{p_B} \quad (6.29)$$

где је:

- v_{RG} , редукована специфична запремина паре

$$v_{RG} = \frac{T_R}{p_R} + c_1 + \frac{c_2}{T_R^3} + \frac{c_3}{T_R^{11}} + \frac{c_4 \cdot p_R^2}{T_R^{11}} \quad (6.30)$$

6.2.3 Специфични топлотни капацитет при константном притиску

Специфични топлотни капацитет у kJ/kmolK воде је

$$c_{pL} = c_{pRL} \cdot R \quad (6.31)$$

где је:

- c_{pRL} , редуковани специфични топлотни капацитет

$$c_{pRL} = b_1 + b_2 \cdot T_R + b_3 \cdot T_R^2 \quad (6.32)$$

Специфични топлотни капацитет водене паре је

$$c_{pG} = c_{pRG} \cdot R \quad (6.33)$$

где је:

- c_{pRG} , редуковани специфични топлотни капацитет

$$c_{pRG} = d_1 + d_2 \cdot T_R + d_3 \cdot T_R^2 - 12 \cdot c_2 \cdot \frac{P_R}{T_R^4} - 132 \cdot c_3 \cdot \frac{P_R}{T_R^{12}} - 44 \cdot c_4 \cdot \frac{P_R^3}{T_R^{12}} \quad (6.34)$$

Константе у једначинама (6.20) – (6.34) дате су у табели 6.2.

Табела 6.2 Константе у једначинама за израчунавање термофизичких својстава

Константа	$\frac{P_D}{10^5} > 0.1$	$\frac{P_D}{10^5} \leq 0.1$
a ₁	0,029587	0,031202
a ₂	-1,07475·10 ⁻⁵	-3,340024·10 ⁻⁵
a ₃	-5,502666·10 ⁻³	-6,913546·10 ⁻³
a ₄	9,668365·10 ⁻⁴	1,253644·10 ⁻³
b ₁	15,118062	17,788217
b ₂	-3,568716	-5,775087
b ₃	0,519057	0,955019
c ₁	0,022141	0,022141
c ₂	-28,547599	-28,547599
c ₃	-6,967196·10 ⁴	-6,967196·10 ⁴
c ₄	-2,680958·10 ⁵	-2,680958·10 ⁵
d ₁	4,641483	5,895557
d ₂	-0,214765	-1,317952
d ₃	0,025698	0,233661

6.2.4 Вискозност

Према [16] динамичка вискозност воде у μPas се рачуна помоћу корелације

$$\mu_L = e_0 + e_1 \cdot \frac{P_D}{10^5} + e_2 \cdot \left(\frac{P_D}{10^5} \right)^2 \quad (6.35)$$

где су:

$$e_0 = \frac{1}{f_1 + f_2 \cdot t + f_3 \cdot t^2 + f_4 \cdot t^3 + f_5 \cdot t^4} + \frac{f_6}{[(t-20)^2 + f_7]} + f_8 \quad (6.36)$$

$$e_1 = f_9 + \frac{f_{10}}{\left[(t-500)^2 + f_{11} \right]} + \frac{f_{12}}{(t+100)^{10}} \quad (6.37)$$

$$e_2 = f_{13} + \frac{f_{14}}{\left[(t-490)^2 + f_{15} \right]} + \frac{f_{16}}{(t+100)^{10}} \quad (6.38)$$

а водене паре према

$$\mu_G = \frac{e_3 + e_4 \cdot \frac{p_D}{10^5} + e_5 \cdot \left(\frac{p_D}{10^5} \right)^2}{10} \quad (6.39)$$

где су:

$$e_3 = f_{17} + f_{18} \cdot t \quad (6.40)$$

$$e_4 = f_{19} + f_{20} \cdot t + f_{21} \cdot t^2 + \frac{f_{22}}{\left[(t-250)^4 + f_{23} \right]} \quad (6.41)$$

$$e_5 = f_{24} + \frac{f_{25}}{\left[(t-300)^4 + f_{26} \right]} \quad (6.42)$$

Константе у једначинама (6.35) – (6.42) дате су у табели 6.3.

Табела 6.3 Константе у једначинама за израчунавање динамичке вискозности

f₁	0,0000444444	f₁₁	18243,2	f₂₁	-0,0000012111
f₂	0,00000126158	f₁₂	-8,8·10 ¹⁹	f₂₂	766827
f₃	-0,00000000522934	f₁₃	0,000035	f₂₃	6971150
f₄	1,03065·10 ⁻¹¹	f₁₄	-5,37016	f₂₄	0,000037
f₅	-7,38169·10 ⁻¹⁵	f₁₅	17435,6	f₂₅	1423130
f₆	25212,81	f₁₆	2,2·10 ¹⁶	f₂₆	1105570000
f₇	104,4441	f₁₇	80,4		
f₈	-5000	f₁₈	0,407		
f₉	0,1	f₁₉	-0,726111		
f₁₀	12223	f₂₀	0,00197222		

6.2.5 Коефицијент дифузије

Према [17] за коефицијент дифузије у гасовима важи

$$\frac{D_{iG} \cdot p_D}{T^{3/2}} = const. \quad (6.43)$$

односно за познати коефицијент дифузије на нормалним условима може се израчунати коефицијент дифузије у гасу

$$D_{iG} = \frac{D_{iGs} \cdot p_s \cdot T_D^{3/2}}{T_s^{3/2} \cdot p_D} \quad (6.44)$$

где су:

- D_{iG} , m^2/s , коефицијент дифузије i -те компоненте у гасу на радним условима;
- D_{iGs} , m^2/s , коефицијент дифузије i -те компоненте у гасу на стандардним условима;
- p_s , Pa, стандардни притисак;
- T_s , K, апсолутна стандардна температура.

Према [17] за коефицијент дифузије у течностима важи

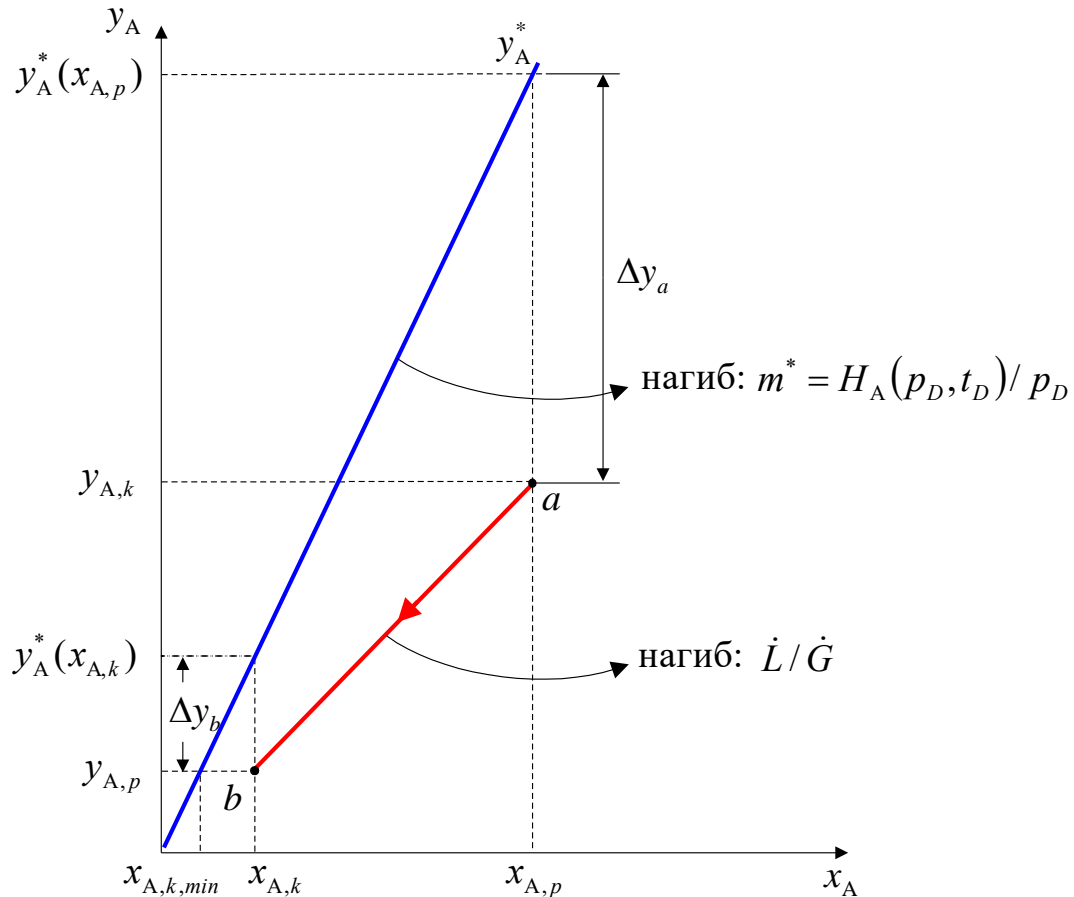
$$\frac{D_{iL} \cdot \mu_B}{T} = const. \quad (6.45)$$

односно

$$D_{iL} = \frac{D_{iLS} \cdot \mu_{BS} \cdot T_D}{T_s \cdot p_D} \quad (6.46)$$

6.3 Операциона линија процеса

Као што је објашњено на почетку овог поглавља, операција деоксигенације воде може бити разматрана као дифузиона операција у двокомпонентном систему (кисеоник + вода) у коме је кисоник компонента која се транспортује. Транспорт кисеоника из течности у гас условљен је интензитетом погонске силе односно обликом и положајем операционе линије процеса у дијаграму молских удела кисеоника у гасу и течности. Дијаграм процеса деоскигенације приказан је на слици 6.2. У случају ниске концентрације кисеоника у води, молски односи у фазама су приближно једнаки молским уделима, па се операција може анализирати у дијаграму $u_A - x_A$.



Слика 6.2 Равнотежна и операциона линија процеса деоксигенације

На дијаграму приказане су равнотежна линија за систем кисеоник – вода чији је нагиб дефинисан Хенријевим законом

$$y_A^* = m^* \cdot x_A = \frac{H_A(p_D, t_D)}{p_D} \cdot x_A \quad (6.47)$$

и операциона линија процеса y_A чији је нагиб дефинисан односом протока течности и гаса \dot{L}/\dot{G} .

Услед десорпције, проток гаса дуж колоне није константан, односно у општем случају десорпције гаса из течности важи

$$\dot{G}_p \neq \dot{G}_k \quad (6.48)$$

где су:

- \dot{G}_p , kmol/s, проток гаса на улазу у колону;
- \dot{G}_k , kmol/s, проток гаса на излазу из колоне.

Из (6.48) следи да је нагиб операционе линије променљива величина односно да је $\dot{L}/\dot{G} \neq const.$

Последица тога јесте чињеница да операциона линија процеса деоскигенације, у општем случају, није права. Међутим, с обзиром на то да је количина кисоника која се транспортује из гаса у течност мала, проток гаса је приближно константан, па важи

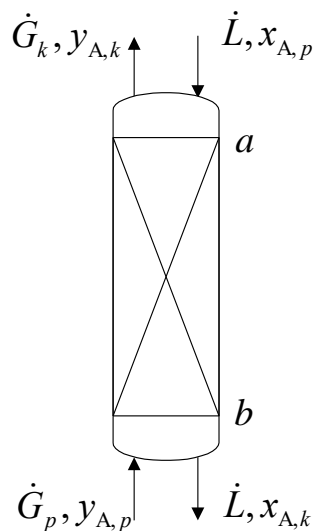
$$\frac{\dot{L}}{\dot{G}} \approx \text{const.}$$

где је проток гаса дефинисан као аритметичка средина пртока гаса на улазу и на излазу из колоне (слика 6.3)

$$\dot{G} = \frac{\dot{G}_p + \dot{G}_k}{2} \quad (6.49)$$

чиме се објашњава линеарна промена молског удела кисеоника у гасу дуж колоне тј. дуж површине за размену супстанције (слика 6.2).

Коначно, биланс колоне по компоненти А (слика 6.3) за произвољни попречни пресек гласи



Слика 6.3 Улазне и излазне величине колоне

$$\dot{G} \cdot y_{A,p} + \dot{L} \cdot x_{A,p} = \dot{G} \cdot y_{A,k} + \dot{L} \cdot x_{A,k} \quad (6.50)$$

одакле се добија једначина операционе линије која има облик

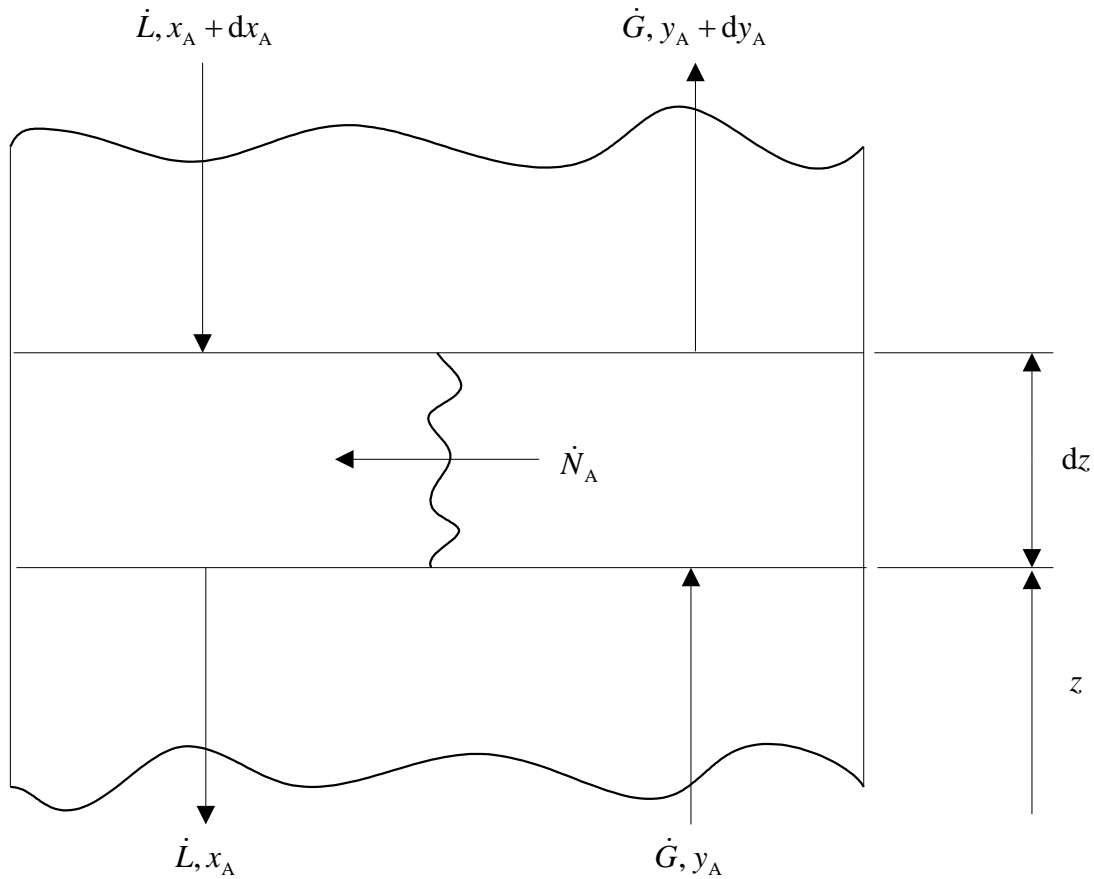
$$y_{A,k} = y_{A,p} + \frac{\dot{L}}{\dot{G}} \cdot (x_{A,p} - x_{A,k}) \quad (6.51)$$

где су:

- $y_{A,k}$, molA/mol(A+B+C), молски удео кисеоника у гасу на излазу из колоне;
- $y_{A,p}$, molA/mol(A+B+C), молски удео кисеоника у гасу на улазу у колону;
- $x_{A,p}$, molA/mol(A+B+C), молски удео кисеоника у води на улазу у колону;
- $x_{A,k}$, molA/mol(A+B+C), молски удео кисоника у води на излазу из колоне.

6.4 Одређивање висине испуне при континуалном контакту гаса и течности

Шематски приказ инфинитезималног елемента површине за размену супстанције дат је на слици 6.4.



Слика 6.4 Елементарна површина за размену супстанције

Једначина биланса за елементарну површину за размену супстанције гласи

$$\dot{G} \cdot y_A = \dot{G} \cdot (y_A + dy_A) + \dot{N}_A \cdot dS \quad (6.52)$$

која после сређивања има облик

$$\dot{N}_A \cdot dS = -\dot{G} \cdot dy_A \quad (6.53)$$

где су:

- \dot{G} , mol/s, проток гаса;
- \dot{N}_A , molA/m²·s, специфични молски флуks кисеоника.

Елементарна површина контакта течности и гаса (Слика 6.4) је

$$dS = A_k \cdot s_v \cdot dz \quad (6.54)$$

где су:

- A_k , m², површина попречног пресека колоне;
- s_v , m²/m³, запреминска површина контакта фаза.

Према концепту два отпора [17], специфични молски флуks кисеоника је

$$N_A = k_y \cdot (y_A - y_A^*) \quad (6.55)$$

па заменом (6.55) и (6.54) у једначину (6.53) се долази до израза

$$k_y \cdot (y_A - y_A^*) \cdot A_k \cdot s_v \cdot dz = -\dot{G} \cdot dy_A \quad (6.56)$$

где су:

- k_y , molA/m²·s·Δу, коефицијент пролаза супстанције у гасу;
- y_A^* , molA/mol(A+C), равнотежни удео кисеоника у гасу.

Коефицијент пролаза супстанције за гасовиту фазу једнак је [17]

$$k_y = \frac{1}{\frac{1}{\beta_y} + \frac{m^*}{\beta_x}} \quad (6.57)$$

где су:

- β_y , molA/[m²·s·(mol/m³)], коефицијент прелаза супстанције у гасу;
- β_x , molA/[m²·s·(mol/m³)], коефицијент прелаза супстанције у течности.

Треба напоменути да у случају ниске концентрације кисеоника у води важи $\beta_y^s \approx \beta_y^e \approx \beta_y^e = \beta_y$ и $\beta_x^s \approx \beta_x^e \approx \beta_x^e = \beta_x$ односно да су коефицијенти прелаза у обе фазе у случају еквимоларног супротносмерног транспорта и транспорта компоненте кроз стагант приближно једнаки [17].

С обзиром да је отпор транспорту супстанције претежно у течности и да важи

$$\frac{1}{\beta_y} \ll \frac{m^*}{\beta_x} \quad (6.58)$$

једначина (6.57) се, у случају деоксигенације, своди на

$$k_y \approx \frac{\beta_x}{m^*} \quad (6.59)$$

Интеграљењем израза (6.56),

$$\int_0^Z dz = -\frac{\dot{G}}{k_y \cdot A_k \cdot s_v} \cdot \int_{y_{A,k}}^{y_{A,p}} \frac{dy_A}{y_A - y_A^*} \quad (6.60)$$

добија се висина испуне

$$Z = \frac{\dot{G}}{k_y \cdot A_k \cdot s_v} \cdot \int_{y_{A,k}}^{y_{A,p}} \frac{dy_A}{y_A - y_A^*} = HTU(k_y) \cdot NTU(k_y) \quad (6.61)$$

где су:

- $HTU(k_y)$, м, висина јединице преноса за гас;
- $NTU(k_y)$, /, број јединица преноса за гас.

У случају да су равнотежна и операциона линија праве и да је дифузиони потенцијал $\lambda \neq 1$, број јединица преноса се може аналитички изразити [18]

$$NTU(k_y) = \int_{y_{A,k}}^{y_{A,p}} \frac{dy_A}{y_A - y_A^*} = \frac{1}{1-\lambda} \cdot \ln\left(\frac{\Delta y_a}{\Delta y_b}\right) \quad (6.62)$$

где су погонске силе на крајевима колоне a и b (Слика 6.2) и дифузиони потенцијал дефинисани као

$$\Delta y_a = m^* \cdot x_{A,p} - y_{A,k} \quad (6.63)$$

$$\Delta y_b = m^* \cdot x_{A,k} - y_{A,p} \quad (6.64)$$

$$\lambda = m^* \cdot \frac{\dot{G}}{\dot{L}} \quad (6.65)$$

6.5 Одређивање излазних концентрација за задату висину испуне

При прорачуну колоне за деоксигенацију могуће је дефинисати два типа инжењерског задатка. Први би се састојао у прорачуну висине испуне за познате протоке и концентрације на улазу и излазу. У претходном одељку је ова процедура дефинисана у потпуности.

Други задатак је израчунавање излазних концентрација кисеоника у гасу и течности за познату висину испуне уз задате протоке гаса и концентрације на улазу у колону.

Код прорачуна концентрација кисеоника у гасу и течности на излазу из колоне полази се од дефиниције висине испуне (6.61) и једначине за број јединица преноса у случају да су операциона и равнотежна линија праве (6.62). Изражавањем броја јединица преноса из (6.62) добија се

$$NTU = \frac{Z}{HTU} = \frac{1}{1-\lambda} \cdot \ln\left(\frac{\Delta y_b}{\Delta y_a}\right) \quad (6.66)$$

Сменом (6.63) и (6.64) у једначину (6.62) добија се израз

$$\frac{m^* \cdot x_{A,k} - y_{A,p}}{m^* \cdot x_{A,p} - y_{A,k}} = \exp(NTU \cdot (1-\lambda)) \quad (6.67)$$

који уз једначину операционе линије процеса (6.51) формира систем једначина са две непознате, $x_{A,k}$ и $y_{A,k}$. Решењем овог система добијају се изрази за израчунавање концентрација кисеоника на излазу из колоне за познату висину испуне

$$x_{A,k} = \frac{\frac{y_{A,p}}{m^*} \cdot \{1 - \exp[-NTU \cdot (\lambda - 1)]\} + x_{A,p} \cdot \exp[-NTU \cdot (\lambda - 1)] \cdot \left(1 - \frac{1}{\lambda}\right)}{1 - \frac{1}{\lambda} \cdot \exp[-NTU \cdot (\lambda - 1)]} \quad (6.68)$$

и

$$y_{A,k} = \frac{y_{A,p} \cdot \left(1 - \frac{1}{\lambda}\right) + x_{A,p} \cdot m^* \cdot \frac{1}{\lambda} \cdot \{1 - \exp[-NTU \cdot (\lambda - 1)]\}}{1 - \frac{1}{\lambda} \cdot \exp[-NTU \cdot (\lambda - 1)]} \quad (6.69)$$

Овде треба напоменути да је процес деоксигенације ограничен равнотежном линијом (слика 6.2), односно да је теоријски минимални садржај кисеоника у води на излазу једнак

$$x_{A,k,min} = x_A^*(y_{A,p}) \quad (6.70)$$

6.6 Димензионисање вакуум пумпе

За потребе димензионисања вакуум пумпе, као и за потребе економске анализе постројења, снага електромотора израчуната је према, једином релевантном, изразу који препоручује произвођач NASH за пумпе са течним прстеном (тип пумпе који је био уграђен на предметно постројење за деоскигенацију)

$$P = 21,4 \cdot \left(\frac{SF}{133,32} \right)^{0,924} \quad (6.71)$$

где су:

- P , kW, снага електромотора за погон вакуум пумпе;
- SF , (kg/h)/Pa, фактор величине вакуум пумпе.

Фактор величине пумпе креће се у опсегу од 0,02 – 16, а рачуна се према изразу

$$SF = \frac{\dot{G}_{Vaz,ekv}}{0,0075 \cdot p_D} \quad (6.72)$$

где су:

- $\dot{G}_{Vaz,ekv}$, kg/h, еквивалентан проток ваздуха који се рачуна према

$$\dot{G}_{Vaz,ekv} = \dot{G} \cdot \sqrt{\frac{T \cdot M_{Vaz}}{T_{ref} \cdot M_m}} \quad (6.73)$$

- \dot{G} , kg/h, проток гасно – парне мешавине на излазу из колоне;
- T , K, апсолутна температура гасно – парне мешавине на излазу из колоне;
- M_{Vaz} , kg/kmol, моларна маса ваздуха;
- T_{ref} , K, апсолутна референтна температура за еквивалентни проток ваздуха која према “Heat Exchange Institute” за постројења под вакуумом износи 20°C односно 293,15K;
- M_m , kg/kmol, моларна маса гасно – парне мешавине на излазу из колоне.

Једначина (6.71) је упоређена са још неколико израза доступних у отвореној литератури при чему се показало да једино она даје задовољавајуће резултате за примену у инжењерској пракси.

6.7 Инфилтрација

6.7.1 Сопствена инфилтрација

Код постројења за вакуумску деоксигенацију напојне воде, продирање атмосферског ваздуха (у даљем тексту инфилтрација) је, због намене самог процеса, изузетно неповољна појава, па се приликом пројектовања постројења посебна пажња поклања спојевима између елемената. Међутим, и поред поштовања препорука за пројектовање постројења под вакуумом, инфилтрацију је немогуће у потпуности елиминисати.

Да би се прецизно дефинисао проток гаса на улазу у колону, пре пуштања постројења у рад, извршено је мерење инфилтрације односно мерење промене апсолутног притиска у систему са временом.

Проток инфилтрираног ваздуха се израчунава полазећи од једначине стања идеалног гаса,

$$p_D \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (6.74)$$

где су:

- V , m^3 , запремина система (позната из конструкције постројења);
- n , mol, број молова;

Замењујући израз за број молова,

$$n = \frac{m_G}{M_{Vaz}} \quad (6.75)$$

у једначину (6.74) и диференцирањем тако добијеног израза, добија се једначина која дефинише промену притиска са временом

$$\frac{dp_D}{d\tau} = \frac{R \cdot T}{V \cdot M_{Vaz}} \cdot \dot{G}_{Inf} \quad (6.76)$$

одакле следи проток инфилтрираног ваздуха

$$\dot{G}_{Inf} = \frac{dp_D}{d\tau} \cdot \frac{V \cdot M_{Vaz}}{R \cdot T} \quad (6.77)$$

Када се једначина (6.77) преведе у диференцијални облик

$$\dot{G}_{Inf} = \frac{\Delta p_D}{\Delta \tau} \cdot \frac{V \cdot M_{Vaz}}{R \cdot T} \quad (6.78)$$

члан $dp_D/d\tau$ постаје $\Delta p_D/\Delta \tau$ што представља измерену промену притиска у јединици времена.

6.7.2 Препоруке из литературе

Према [21] инфилтрација се може израчунати да основу израза,

$$\tilde{G}_{Inf} = a \cdot V^b \quad (6.79)$$

где су:

- a, b , параметри који зависе од притиска у систему и усвајају се према табели 6.4;
- V, m^3 , укупна запремина система односно дегазатора.

Табела 6.4 Параметри у једначини (6.79)

p_D [kPa]	a	b
12 – 101,3	0,9430	0,6630
2,8 – 12	0,6969	0,6617
0,41 – 2,8	0,4784	0,6579
0,13 – 0,41	0,2415	0,6568
< 0,13	0,1220	0,6639

6.8 Статистички показатељи

За процену квалитета регресионих једначина коришћени су следећи статистички показатељи [22]:

- корелациони однос

$$CR = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^n (z_i - z_i^c)^2}{\sum_{i=1}^n (z_i - z_{sr})^2}} \quad (6.80)$$

- средње квадратно одступање

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{z_i - z_i^c}{z_i} \right)^2}{n}} \quad (6.81)$$

- максимална релативна грешка

$$RE_{max} = \max \left[\frac{z_i - z_c(x_i)}{z_i} \right] \quad (6.82)$$

где су:

- z_i , i -та вредност зависно променљиве;
- z_i^c , i -та вредност зависно променљиве израчуната применом корелационе једначине $z_i^c = f(x_i)$;
- z_{sr} , средња вредност зависно променљиве за n задатих парова,

$$z_{sr} = \frac{\sum_{i=1}^n z_i}{n} \quad (6.83)$$

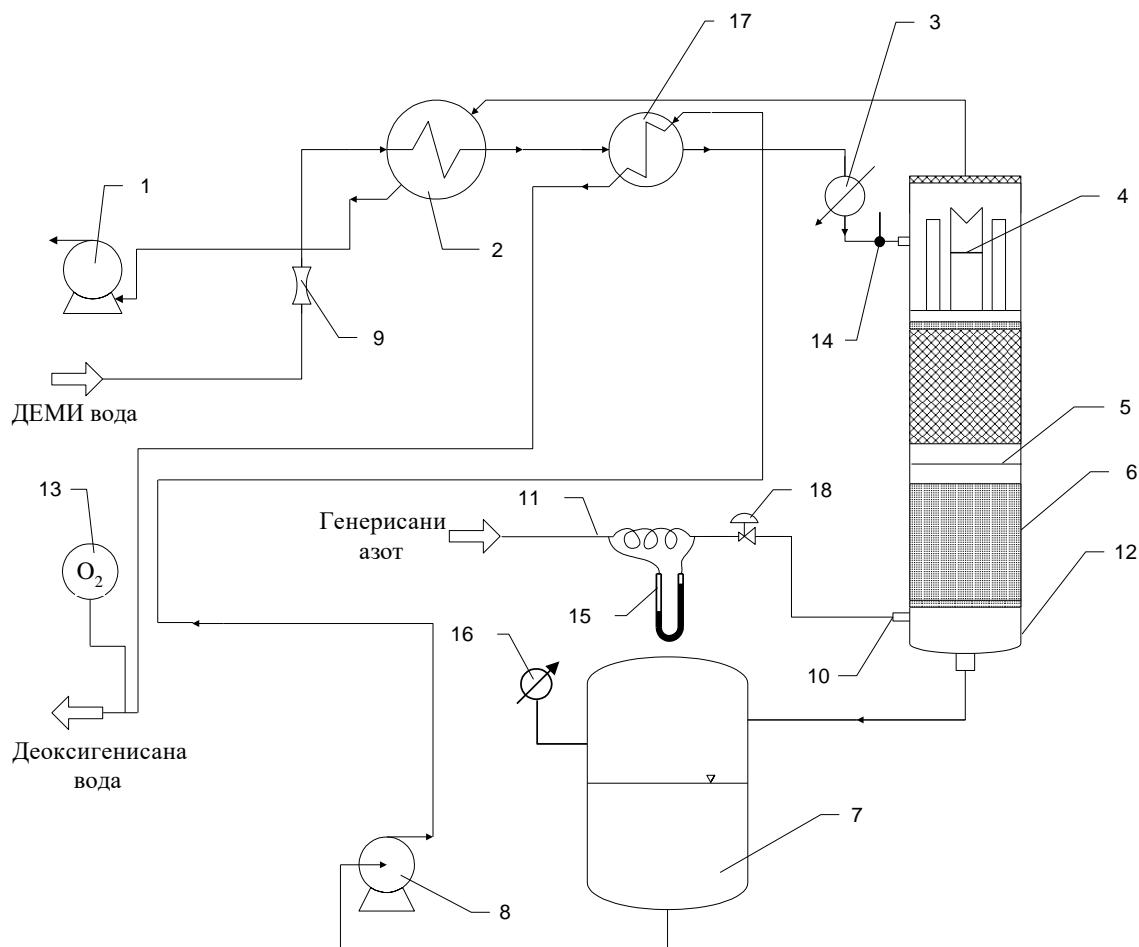
7 ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИНСТАЛАЦИЈА И ПОСТУПАК МЕРЕЊА

Експериментални рад за потребе ове дисертације је извршен на индустријском постројењу за вакуумску деоксигенацију које се налази на топлани Баново брдо у оквиру постројења за припрему напојне воде. Детаљни опис постројење дат је у поглављу 3.

7.1 Опис инсталације

Упрошћена шема експерименталне инсталације са мерном опремом приказана је на слици 7.1, са основним елементима:

1. Вакуум пумпа;
2. Дефлегматор;
3. Електрокотао;
4. Дистрибутер течности;
5. Редистрибутер;
6. Испуна;
7. Резервоар деоксигенизоване воде;
8. Пумпа деоксигенизоване воде;
9. Мерило протока;
10. Улаз генерисаног азота;
11. Линија генерисаног азота;
12. Колона са испуном;
13. Сензор удела кисеоника у води на излазу из деоксигенатора;
14. Термометар;
15. Мерна стаза са U цеви за мерење протока генерисаног гаса;
16. Манометар;
17. Рекуператор;
18. Редукциони вентил за генерисани гас.



Слика 7.1 Шематски приказ инсталације са карактеристичним параметрима

Хемијски припремљена вода температуре између 15°C и 20°C се преко регулационог вентила и мерила протока (9) уводи у цеви дефлегматора (2), који је постављен на врху десорпционе колоне. Након дефлегматора (2) вода пролази кроз рекуператор топлоте (17) који је израђен као бајонетни размењивач топлоте. Процедура топлотног прорачуна бајонетних размењивача топлоте, према којој је и рекуператор (17) димензионисан, представљена је у [24].

Пре уласка у колону (12), температура воде се подешава на жељену вредност помоћу електричног котла (3). Максималну вредност температуре воде представљала је равнотежна температура на притиску десорпције како не би дошло до кључања течности. Температура воде на улазу у колону се мери помоћу сонде Pt-100 (14).

Након електричног котла (2) вода се уводи у колону (12) са испуном од Палових прстенова (6) који су приказани на слици 7.2. Карактеристике предметне испуне дате су у табели 6.1.



Слика 7.2 Палови прстенови - испуна

Табела 7.1 Карактеристике испуне

Тип испуне	Палови прстенови
Материјал	1.4301 (X5 CrNi 18-10)
Називна величина d_{isp} , mm	25,4
Специфична површина s_v , m ² /m ³	193,6
Порозност ε , m ³ /m ³	0,961
Бр. комада у јед. запремине n , ком/m ³	47794
Маса комада испуне m , g/ком	6,04

На врху колоне је постављен дистрибутер течности (4) који обезбеђује равномерно квашење испуне. Основна намена испуне је да се оствари велика површина контакта течности и гаса приликом деоксигенације, што омогућава ефикасну десорпцију кисеоника из воде. Вода која је прошла кроз колону се слива у проточни резервоар (7), на коме су постављена мерила за аутоматско одржавање нивоа, мерила за детекцију минималног и максималног нивоа, као и нивоказно стакло. Даље се помоћу пумпе (8) вода транспортује ка рекуператору топлоте (17) и даље ка потрошачима односно танку припремљене воде. Концентрација кисеоника у деоксигенизованој води се мери помоћу анализатора (13) раствореног кисеоника HUAKEYI НК-318 чије карактеристике су приказане у табели 7.2. Изглед сензора анализатора постављеног на инсталацију приказан је на слици 7.3.

Табела 7.2 Карактеристике анализатора кисеоника

Мерни опсег	0-20 µg/l, 0-200 µg/l, 0-20 mg/l (аутоматски опсег)
Резолуција	0,1µg/l, 0,01mg/l
Тачност	±3% или 1µg/l (већа вредност)



Слика 7.3 Сензор за мерење O₂ у води

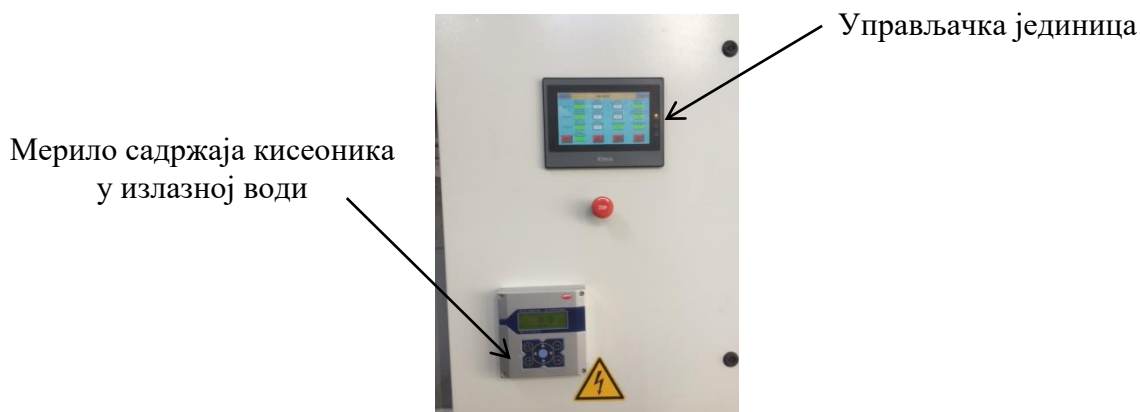
На линији азота (11) се у склопу генератора налази запорни вентил, пригушни вентил и филтер. Проток генерисаног азота се мери помоћу отпорне стазе и U цеви са водом (15). Између отпорне стазе (15) и прикључка за улаз азота у колону (10) постављен редукциони вентил (18).

Дефлегматор (2) је добошаста размењивач топлоте постављен на врху колоне. Кроз међуцевни простор дефлегматора протиче мешавина водене паре и десорбованих гасова (азота и кисеоника) са врха колоне. Ова мешавина гасова се на улазу у дефлегматор налази на температури деоскигенације.

При проласку кроз дефлегматор (2) гасна мешавина се хлади уз кондензацију водене паре. То значајно смањује проток гаса који струји ка вакуум пумпи (1) односно до смањења снаге мотора за погон вакуум пумпе.

Након кондензације паре у дефлегматору гасна струја пролази кроз сепаратор који је саставни део дефлегматора. Гасна фаза која напушта сепаратор представља мешавину првенствено азота, водене паре и кисеоника. Ова гасна мешавина се уводи у вакуум пумпу (1) одакле се одводи у атмосферу. Издвојена вода из сепаратора се повратним цевоводом преко U цеви враћа назад на врх колоне.

С обзиром да су мерења вршена на индустријском постројењу, подешавање радног режима и читавање параметара вршено је преко централне управљачке јединице која је приказана на слици 7.4.



Слика 7.4 Централна управљачка јединице

7.2 Поступак мерења

Пре почетка самих мерења, направљена је матрица експеримента на основу резултата прорачуна који су обављени у склопу припрема истраживања. На основу протока воде израчуната је теоријска минимална количина гаса неопходна за обављање операције деоксигенације на основу чега је дефинисан проток генерисаног азота за сваки проток воде. Параметри који су варирани током мерења и њихови опсеги дати су у табели 7.3.

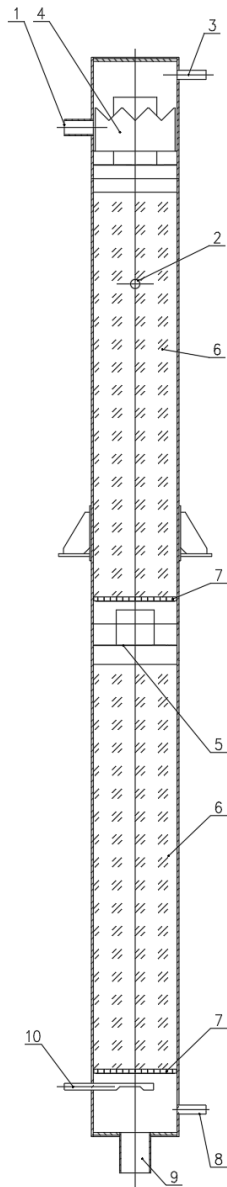
Табела 7.3 Опсеги промена параметара током мерења

Параметар	Опсег
p_D [PaA]	5700 – 11600
t_L [°C]	20,2 – 39,1
\dot{G}_{Gen} [kg/h]	0,152 – 0,342
\dot{L} [kg/h]	1190 – 11400

Подешавање радног режима деоксигенатора вршено је следећим редоследом:

- подешавање густине орошавања односно протока воде помоћу електромоторног вентила постављеног испред мерила протока (9);
- подешавање апсолутног притиска у деоксигенатору помоћу кугластог вентила на вакуум пумпи;
- подешавање протока азота преко електромоторног вентила (18) који је постављен на линији генерисаног азота у односу на ниво у U цеви (у табели 7.4 дата је зависност разлике висина у U цеви и протока у kg/h);
- подешавање температуре улазне воде помоћу електричног котла (3).

Пресек експерименталне колоне приказан је на слици 7.5.



Легенда:

1. улаз ДЕМИ воде
2. поврат кондензата из дефлегматора
3. прикључак за усис вакуум пумпе
4. дистрибутер
5. редистрибутер
6. испуна од Палових прстенова
7. решетка
8. прикључак
9. излаз деоксигенисане воде
10. улаз генерисаног азота

Слика 7.5 Експериментална колона

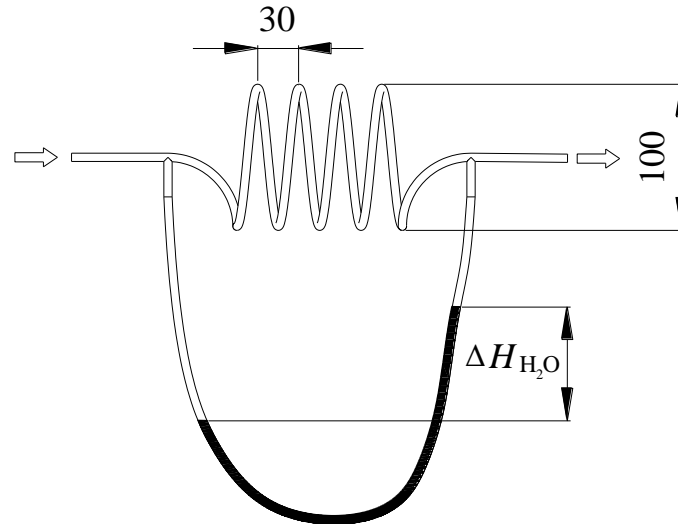
Табела 7.4 Протоци азота мерени преко U-цеви

$\Delta H_{\text{H}_2\text{O}}$ [mm]	10	20	30
\tilde{G}_{Gen} [kg/h]	0,152	0,253	0,342

Након подешавања радног режима, сензор за кисеоник је потапан у недегазирану ДЕМИ воду, како би за свако мерење био на вредности садржаја кисеоника у води на улазу у колону.

7.2.1 Проток азота

Мерење протока азота вршено је помоћу отпорне стазе и U цеви са водом односно мерењем пада притиска кроз цев познате геометрије. Отпорна стаза је израђена од бакрне цеви, праве дужине 1m, унутрашњег пречника 4mm. Основне геометријске димензије отпорне стазе приказане су на слици 7.6.



Слика 7.6 Мерна стаза за мерење протока азота

Минимални протоци азота су за унапред дефинисане протоке течности одређени прорачуном. За тако дефинисане протоке, пад притиска при струјању азота кроз завојницу се одређује према изразу

$$\Delta p_z = \xi \cdot \frac{l_z}{d_u} \cdot \frac{\rho \cdot w^2}{2} \quad (7.1)$$

где су:

- ξ , коефицијент трења које се за струјање кроз завојницу ирачунава на основу израза,

$$\xi = \frac{64}{Re} \cdot \left[1 + 0,033 \cdot [\log(De)]^4 \right] \quad (7.2)$$

- De , Динов број

$$De = Re \cdot \sqrt{\frac{d_u}{d_z \cdot \left[1 + \left(\frac{s_z}{\pi \cdot d_z} \right)^2 \right]}} \quad (7.3)$$

- Re , Рејнолдсов број

$$Re = \frac{\rho \cdot w \cdot d_u}{\mu} \quad (7.4)$$

- l_z , m, дужина праве завојнице;
- d_u , mm, унутрашњи пречник завојнице;

- w , m/s, брзина струјања азота кроз завојницу. Својства азота су усвојена за температуру од 20°C.

Коначно, за познати проток односно пад притиска на отпорној стази, израчунава се разлика нивоа U цеви у mm

$$\Delta H_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{\Delta p}{\rho_{\text{H}_2\text{O}} \cdot g} \cdot 1000 \quad (7.5)$$

7.3 Инфилтрација

Мерење инфилтрације је обављено пре пуштања постројења у рад и то тако што је вакуум пумпа пуштена у рад док није постигла максимални подпритисак, након чега је комплетан дегазатор изолован вентилима. Бележење притиска вршено је на сваких три сата чиме је добијен члан $\Delta p / \Delta \tau$ у једначини (6.78) и помоћу исте једначине израчунат проток инфитрираног ваздуха.

8 АНАЛИЗА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИХ РЕЗУЛТАТА

8.1 Анализа резултата мерења инфилтрације

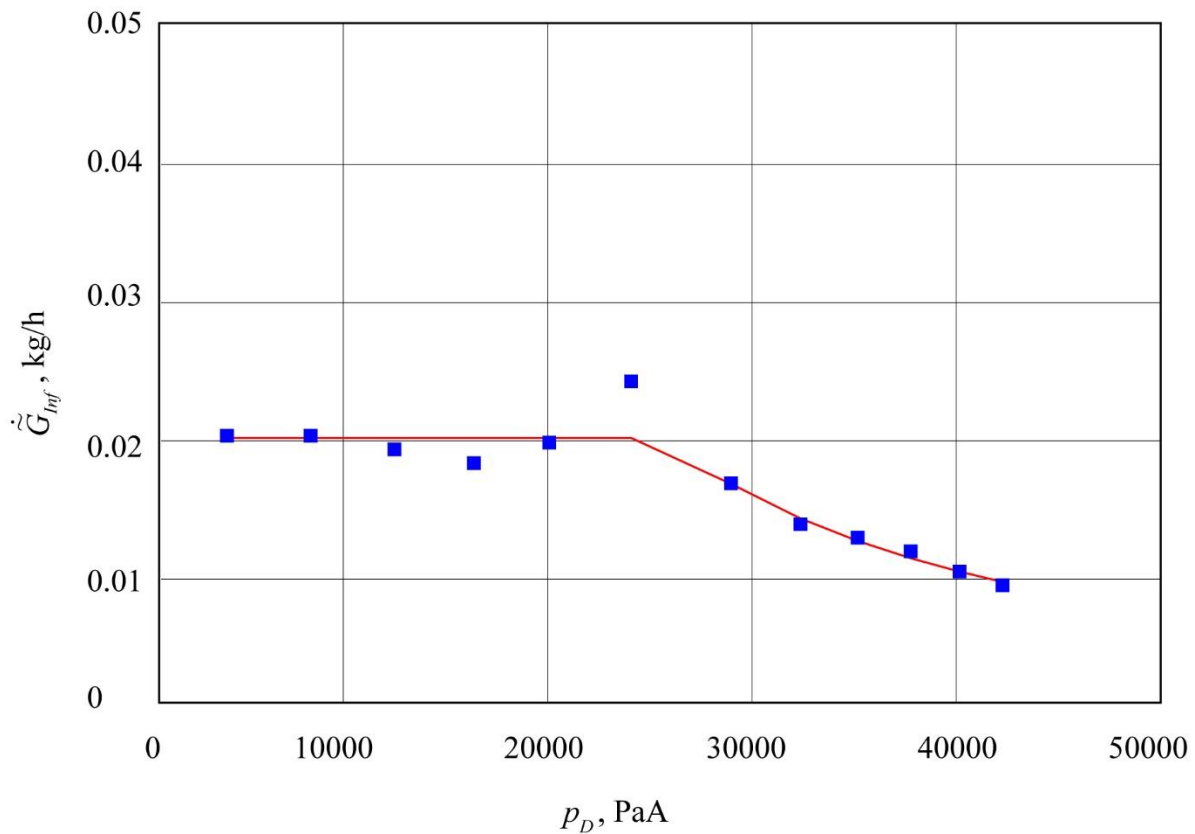
Обрадом података датих у прилогу 1 установљена је следећа зависност протока инфилтрираног ваздуха од апсолутног притиска у систему,

$$\dot{G}_{Inf} = \begin{cases} 0,02 & p_D \leq 24100 \text{ PaA} \\ \frac{59250}{p_D^{1,468}} & p_D > 24100 \text{ PaA} \end{cases} \quad (8.1)$$

где је:

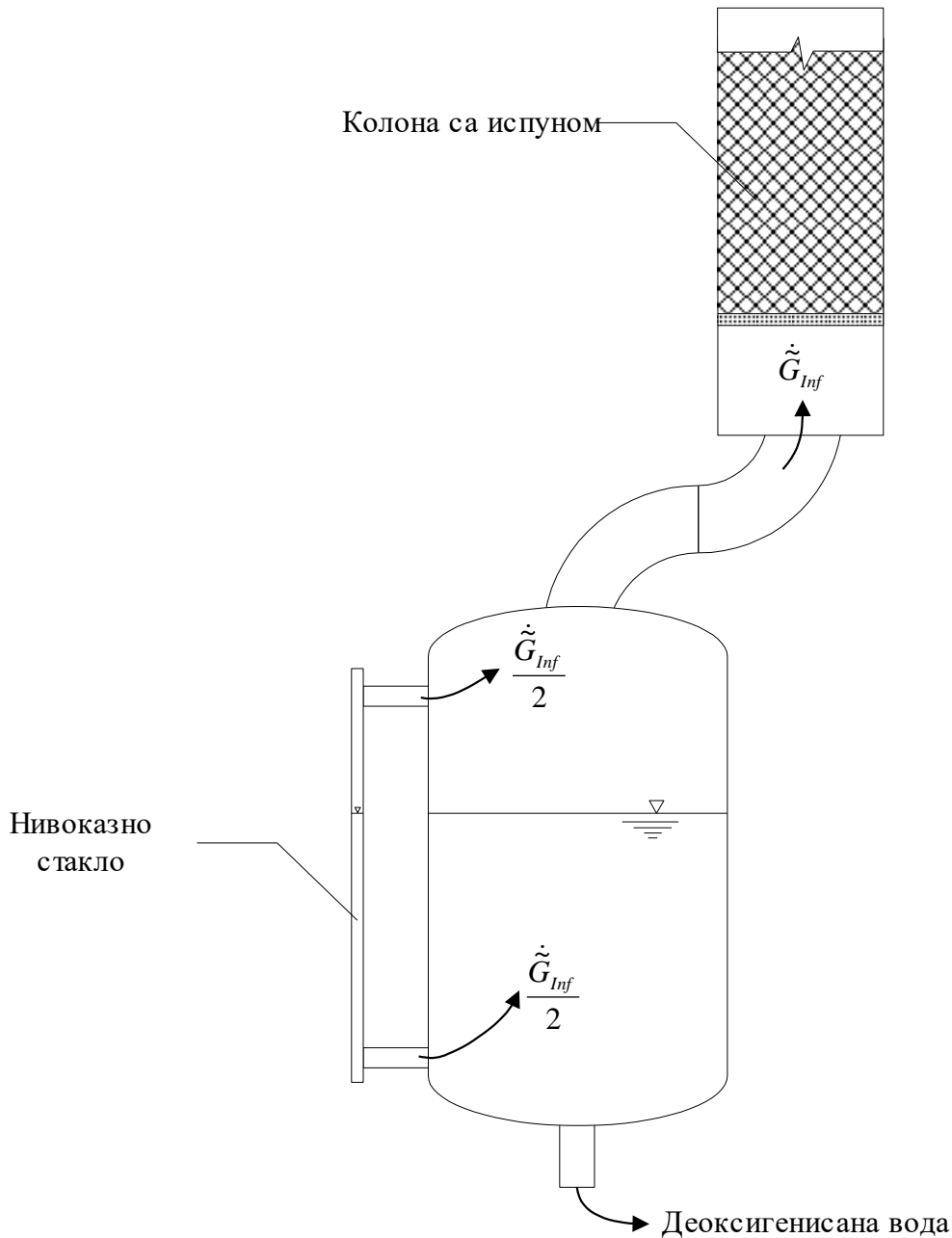
- \dot{G}_{inf} , kg/h, проток инфилтрираног ваздуха.

На слици 8.1 приказан је дијаграм мерених тачака и крива једначине (8.1).



Слика 8.1 Дијаграм инфилтрације

На слици 8.2 шематски је приказан резервоар деоксигенизоване воде са нивоказним стаклом и извором инфилтрације. Са слике се види да је укупни проток инфилтрације сума протока ваздуха на горњем и на доњем прикључку нивоказа, односно



Слика 8.2 Извори инфилтрације

Имајући у виду да се притисак деоксигенације током мерења кретео у опсегу од 5000 – 12000PaА, из једначине (8.1) следи да је проток инфилтрираног ваздуха једнак 0,02kg/h за све радне режиме деоксигенатора.

Инфилтрација од 0,02kg/h је измерена пре пуштања постројења у раду односно док су сви елементи били суви. С обзиром да су спојеви елемената деоскигенатора изведени претежно као заварени, приликом вршења базних мерења показало се да је нивоказно стакло односно спој нивоказа и резервоара деоксигенизоване воде главни извор инфилтрације.

$$\tilde{G}_{Inf} = \tilde{G}_{Inf1} + \tilde{G}_{Inf2} \quad (8.2)$$

где су:

- \dot{G}_{Inf1} , kg/h, проток инфилтрираног ваздуха на горњем прикључку;
- \dot{G}_{Inf2} , kg/h, проток инфилтрираног ваздуха на доњем прикључку.

Под претпоставком да је проток ваздуха на оба прикључка једнак можемо писати

$$\dot{G}_{Inf} = \frac{\dot{G}_{Inf}}{2} + \frac{\dot{G}_{Inf}}{2} \quad (8.3)$$

Заменом измерене инфилтрације у једначину (8.3) добија се проток инфилтрираног ваздуха на једном прикључку који износи 0,01kg/h.

Коначно, с обзиром на ниво течности у резервоару, усвојено је да је извор инфилтрације само горњи прикључак, односно у овом раду је усвојен проток инфилтрираног ваздуха од 0,01kg/h.

8.2 Критеријуми за процену прихватљивости радног режима

Критеријуми на основу којих је извршена процена радних режима односно тачака које улазе у даљу обраду су формиран на основу физичких ограничења процеса деоксигенације. На основу ових критеријума, од укупно 189 мерних тачака одбачено је 39.

Критеријуми који морају бити задовољени, да би се радни режим оценио као коректан су:

- $x_{A,k} > x_{A,k,min}$

односно на основу слике 6.2, излазни садржај кисоника у води, теоријски, не сме да буде нижи од равнотежног садржаја;

- $\Delta y_{a,mer} > 0$ и $\Delta y_{b,mer} > 0$

односно разлике удела кисеоника у гасу на крају колоне a и на крају b дефинисани једначинама (6.63) и (6.64) не смеју бити мањи од нуле.

Радни режими који нису задовољили ове критеријуме дати су у прилогу 3.

8.3 Поређење корелација на основу висине јединице преноса

Упоредна анализа корелација за размену супстанције биће извршена поређењем измерене висине јединице преноса (HTU_{mer}) и висине јединице преноса добијене помоћу прорачунских процедура дефинисаних у [19] и [20] (HTU_{kor}).

За познату висину испуне, из једначина (6.63) и (6.64), можемо помоћу измерених величина израчунати висину јединице преноса

$$HTU_{mer} = \frac{z}{NTU} = \frac{z}{\frac{1}{1-\lambda} \cdot \ln\left(\frac{\Delta y_b}{\Delta y_a}\right)} \quad (8.4)$$

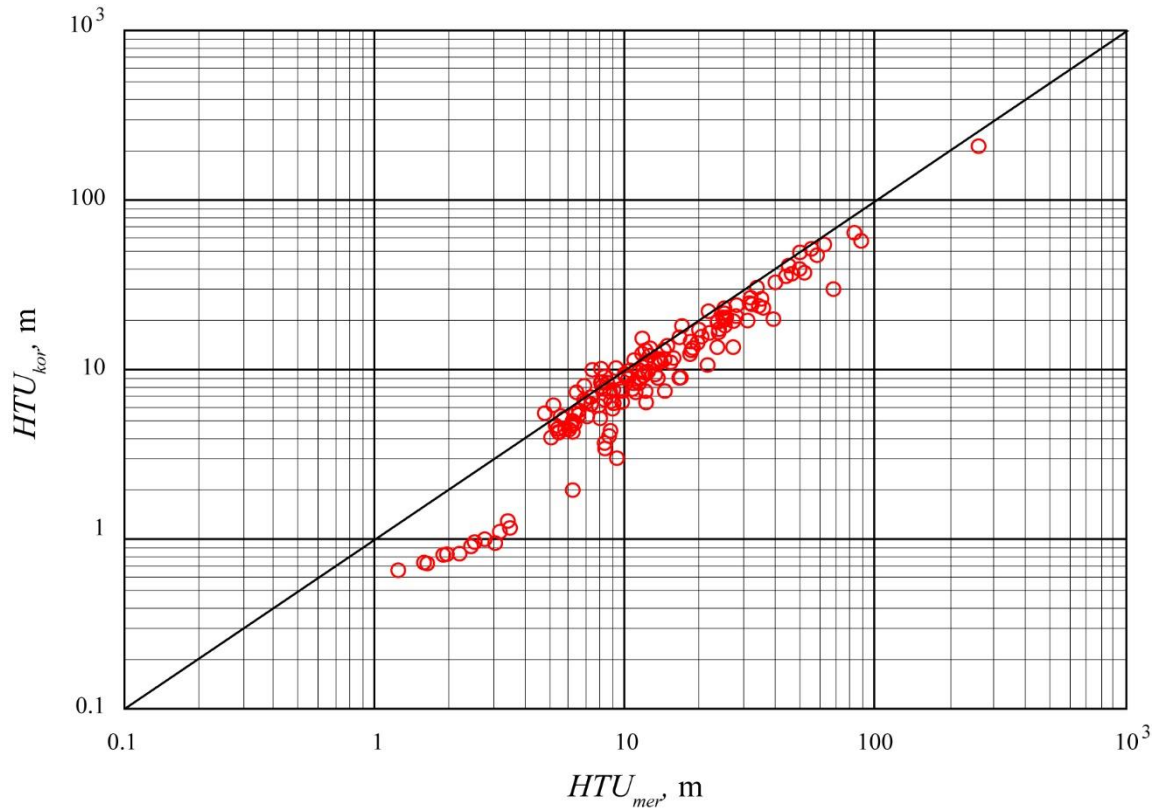
Из једначине (5.63) следи висина јединице преноса добијена моделом

$$HTU_{kor} = \frac{\dot{G}}{A_k \cdot k_y \cdot s_v \cdot \Psi} \quad (8.5)$$

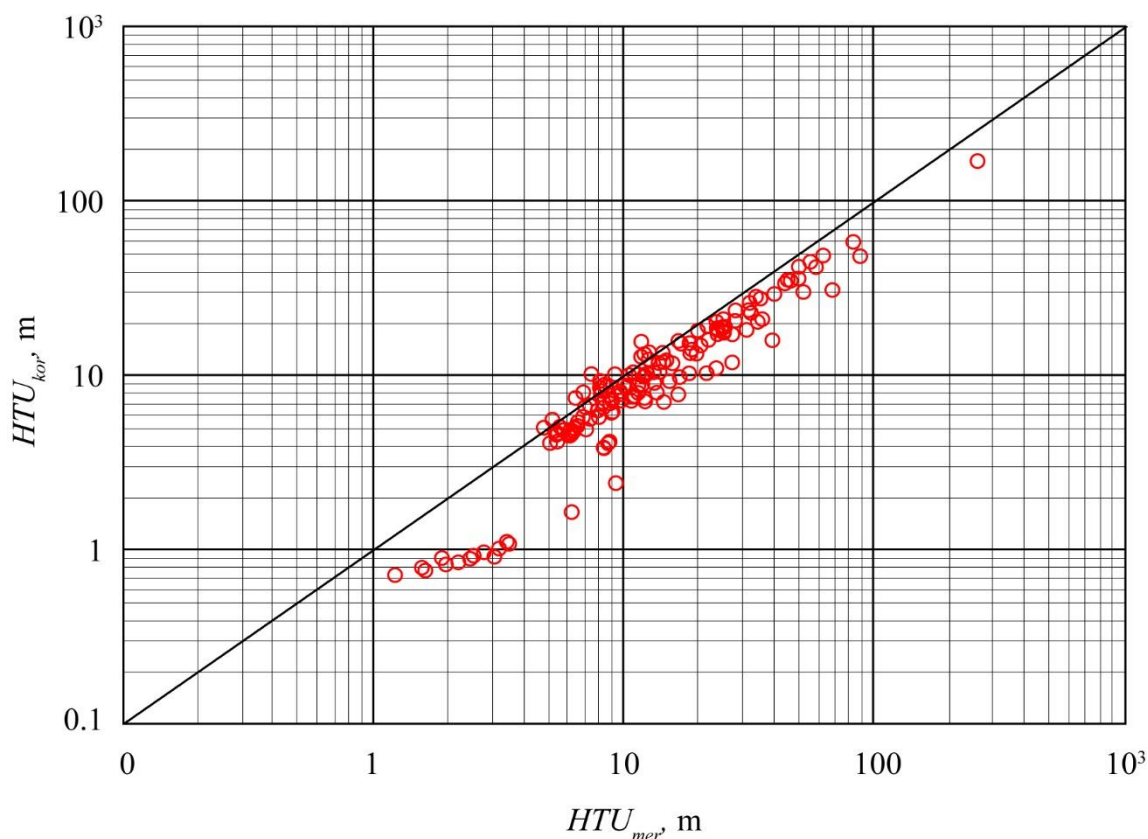
где је члан $s_v \cdot \Psi$ стварна површина контакта течности и гаса, при чему се Ψ рачуна за сваку од процедура посебно.

8.4 Квалитет корелација предложених у [19] и [20]

Резултати добијени на основу једначина (8.4) и (8.5) приказани су на паритетним дијаграмима измерене и моделиране висине јединице преноса за обе процедуре (*parity plots*), који су дати на сликама 8.3 и 8.4.



Слика 8.3 Паритетни дијаграм према [20]



Слика 8.4 Паритетни дијаграм према [19]

Статистички параметри прорачунских процедура дати су у табели 8.1.

Табела 8.1 Статистички показатељи процедура

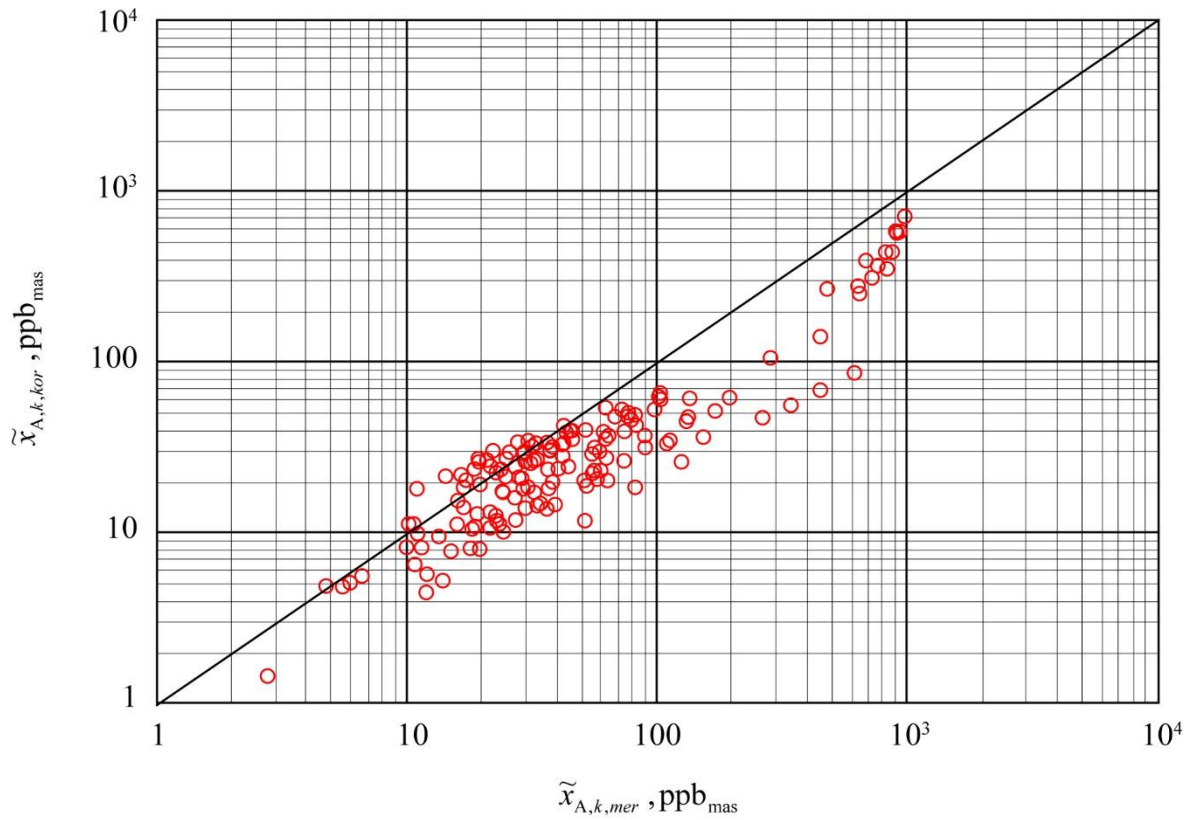
Статистички параметар	Процедура из [20]	Процедура из [19]
Корелациони однос CR [%]	95,65	91,17
Стандардна девијација SD [%]	30,35	32,31
Максимална грешка RE_{max} [%]	68,39	73,75

Из табеле 8.1 је очигледно да процедура коју су предложили Билет и Шултс [20] нешто боље корелише мерене податке у односу на процедуру коју су дали Онда и Сада [19]. Може се рећи да је ова предност модела Билета и Шултса била очекивана, с обзиром да њихова процедура има теоријску подлогу која је детаљно описана у [23].

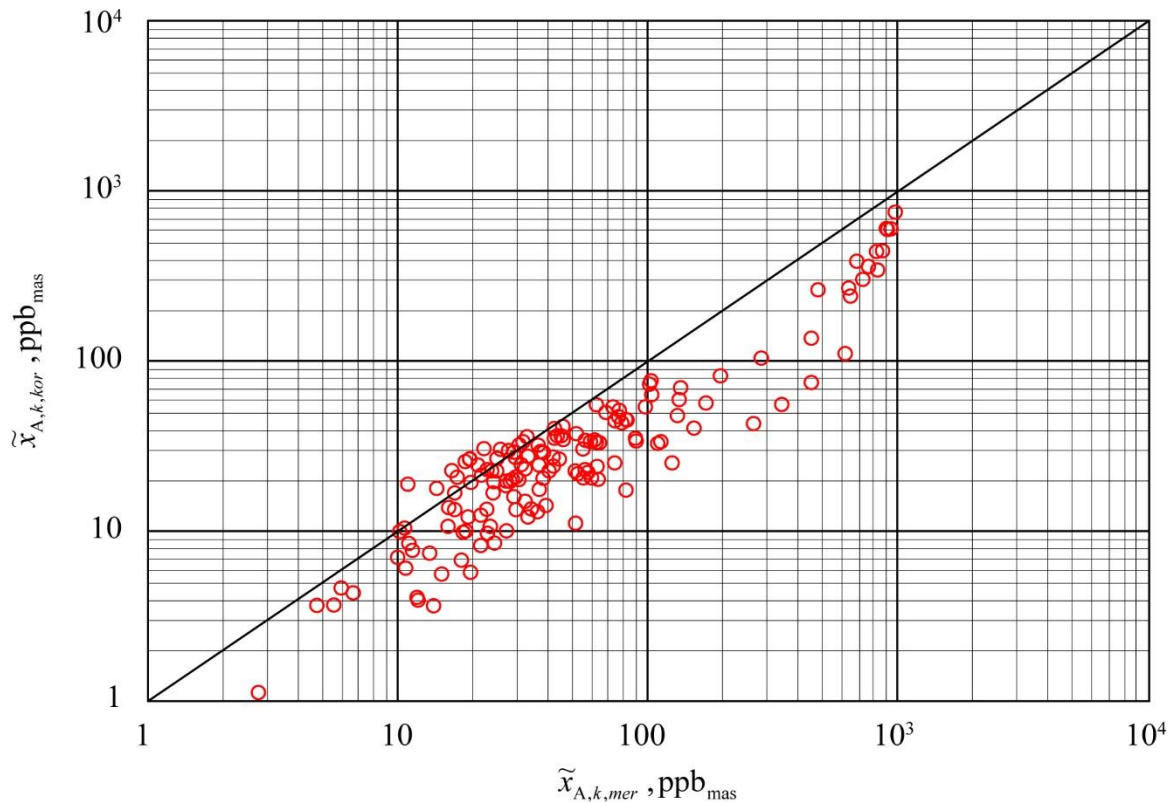
Такође, треба напоменути, да значајан утицај на показатеље у табели 8.1 имају тачке присутне на оба дијаграма у опсегу $HTU_{mer} = 1 - 4$, о чему ће бити више речи у даљем тексту.

Да би боље проучили радне режиме са значајним одступањем од општег тренда расподеле тачака на паритетним дијаграмима висине јединице преноса, на сликама 8.5 и 8.6 приказани су паритетни дијаграми удела кисеоника у води на излазу из колоне.

На дијаграмима су вредности удела кисеоника у води на излазу израчунати помоћу једначине (6.68) у којој је NTU рачунат за познату висину испуне и модел који се разматра.



Слика 8.5 Паритетни дијаграм удела кисеоника у води на излазу из колоне према [20]



Слика 8.6 Паритетни дијаграм удела кисеоника у води на излазу из колоне према [19]

На оба дијаграма на сликама 7.5 и 7.6, уочљиве су тачке са повишеним одступањем за вредности удела кисеоника у излазној води $x_{A,k,mer} > 100\text{ppb}_{\text{mas}}$. Интуитивно се може закључити, што се може видети и из резултата мерења, да је реч о радним режимима у којима је проток течности био знатно виши од номиналног.

С обзиром на то да удео кисеоника у води на излазу из колоне зависи, не само од протока течности, већ и од протока гаса, односно њиховог односа, што је показано кроз једначину (6.68), да бисмо били у могућности да окарактеришемо утицај оба протока на садржај кисеоника у води на излазу, увешћемо параметар односа кинетичких енергија течности и гаса (FLG)

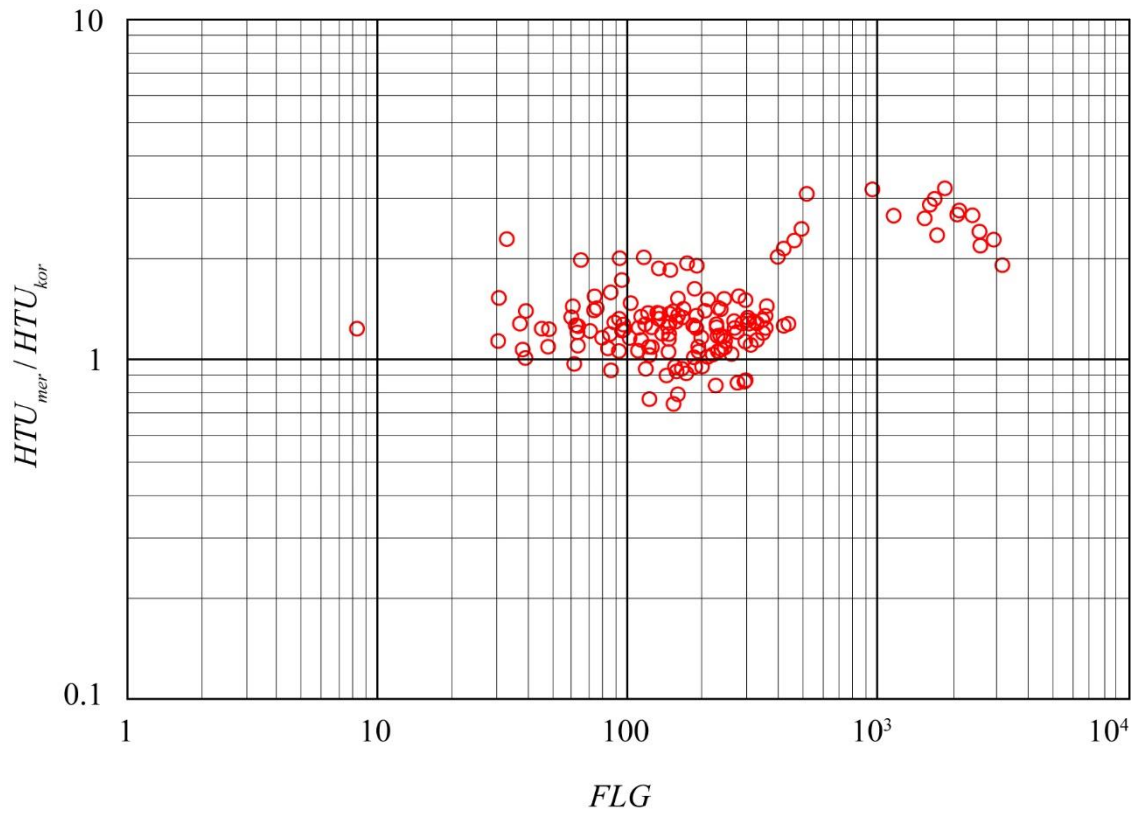
$$FLG = \frac{\dot{V}_L}{\dot{V}_G} \sqrt{\frac{\rho_L}{\rho_G}} \quad (8.6)$$

где су:

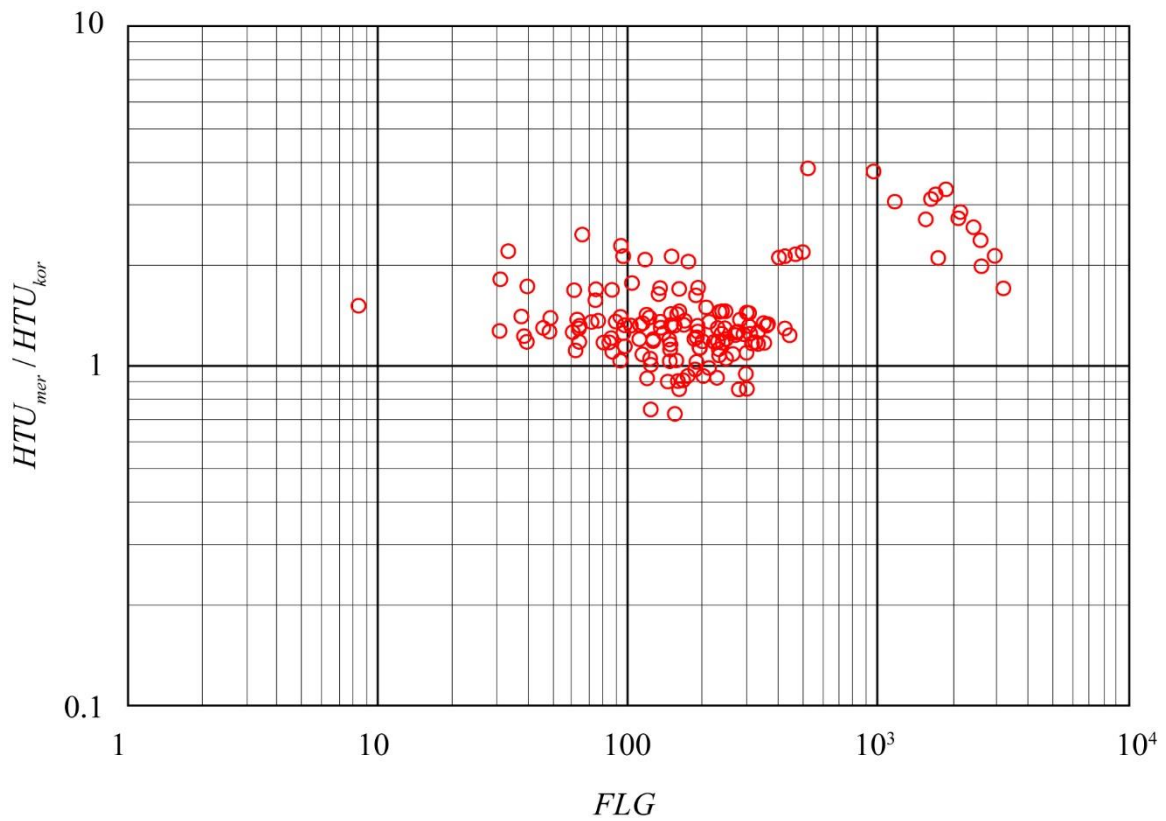
- \dot{V}_L , m^3/s , проток течности;
- \dot{V}_G , m^3/s , проток гаса;
- ρ_L , kg/m^3 , густина течности на радним условима;
- ρ_G , kg/m^3 , густина гаса на радним условима.

Помоћу параметра FLG могуће је прецизније дефинисати радне режиме који одступају од општег тренда односно радне режиме који испољавају значајне релативне грешке у односу на предметне моделе, како је и показано у претходном делу овог поглавља.

На сликама 8.7 и 8.8 приказани су дијаграми односа HTU_{mer} и HTU_{kor} у функцији од параметра FLG .



Слика 8.7 Утицај протока фаза на висину јединица преноса [20]



Слика 8.8 Утицај протока фаза на висину јединица преноса [19]

На оба дијаграма се може видети да је вредност односа HTU_{mer}/HTU_{kor} за већину радних режима већа од 1, односно важи

$$HTU_{mer} > HTU_{kor} \quad (8.7)$$

Уврштавањем једначине (5.43) у једначину којом је дефинисана висина јединице преноса (5.45)

$$HTU = \frac{\dot{G}}{k_y \cdot A_k \cdot s_v} \quad (8.8)$$

добива се

$$\beta_{L,mer} < \beta_{L,kor} \quad (8.9)$$

тј. да је измерени коефицијент прелаза супстанције у течности, $\beta_{L,mer}$, који се добија заменом једначина (6.63) и (6.64) у (8.4), за већину радних режима мањи од коефицијента прелаза супстанције, $\beta_{L,kor}$, који је добијен корелацијама предложеним у [19] и [20].

Такође, на оба дијаграма су јасно уочљиви радни режими који значајно одступају од општег тренда, а за које је вредност параметра FLG виша од 1000. Из једначине (8.6) се може закључити да су то режими код којих је проток течности био знатно већи од протока гаса.

8.5 Анализа резултата испитивања процеса деоскигенације

Укупни број радних режима износио је 189 од којих је, након обраде описане у поглављу 8.2, као валидних за даљу анализу дефинисано 150.

Након статистичке обраде формиране базе података од 150 тачака, добијена је следећа корелација за прорачун Шервудовог броја за течност,

$$Sh_L = \frac{\beta_L \cdot l_{Sh}}{D_L} = \frac{\beta_L}{D_L \cdot s_v \cdot \psi} = 8,18 \cdot Re_L^{0,62} \cdot Sc_L^{0,75} \cdot \frac{1}{\sqrt{FLG + 332,56}} \quad (8.10)$$

која важи у областима:

- $Re_L = 22 - 245$;
- $FLG = 8 - 3111$;

где су:

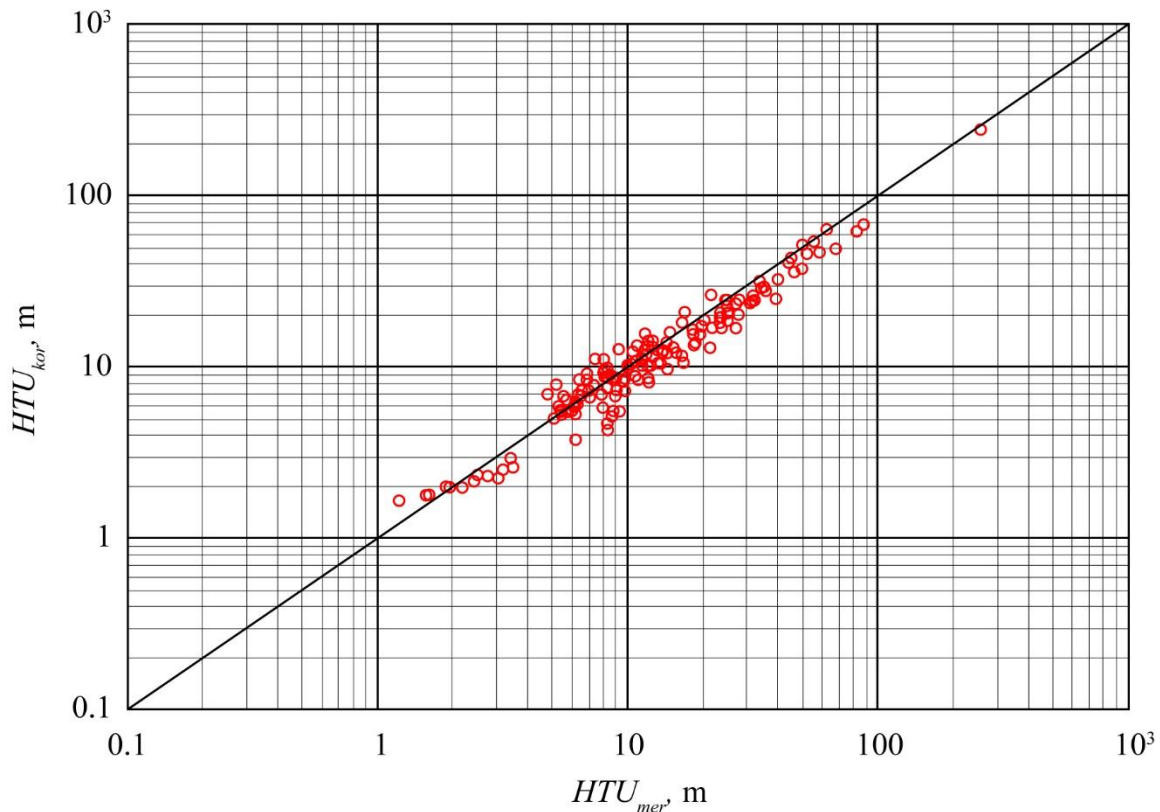
- $Re_L = \frac{w_L \cdot \rho_L \cdot l_{Re}}{\mu_L}$, Рејнолдсов број;
- $l_{Re} = \frac{1}{s_v}$, m^3/m^2 , карактеристична дужина у Рејнолдсовом броју;
- $l_{Sh} = \frac{1}{\psi \cdot s_v}$, m^3/m^2 , карактеристична дужина у Шервудовом броју.

У једначини (8.10) интензитет квашења ψ се рачуна према изразу (4.10). У табели 8.2 дати су статистички показатељи једначине (8.10).

Табела 8.2 Квалитет новопредложене корелације (8.10)

Статистички параметар	Корелација (8.10)
Корелациони однос CR [%]	98,01
Стандардна девијација SD [%]	20,82
Максимална грешка RE_{max} [%]	49,06

Ради визуелног поређења новопредложене корелације за израчунавање Шервудовог броја односно коефицијента прелаза супстанције у течности, са корелацијама предложеним у [19] и [20], на сликама 8.9 и 8.10 приказани су дијаграми идентични онима датим у поглављу 8.4. На слици 8.11 је приказан дијаграм на основу кога се такође јасно види квалитет новопредложене корелације.

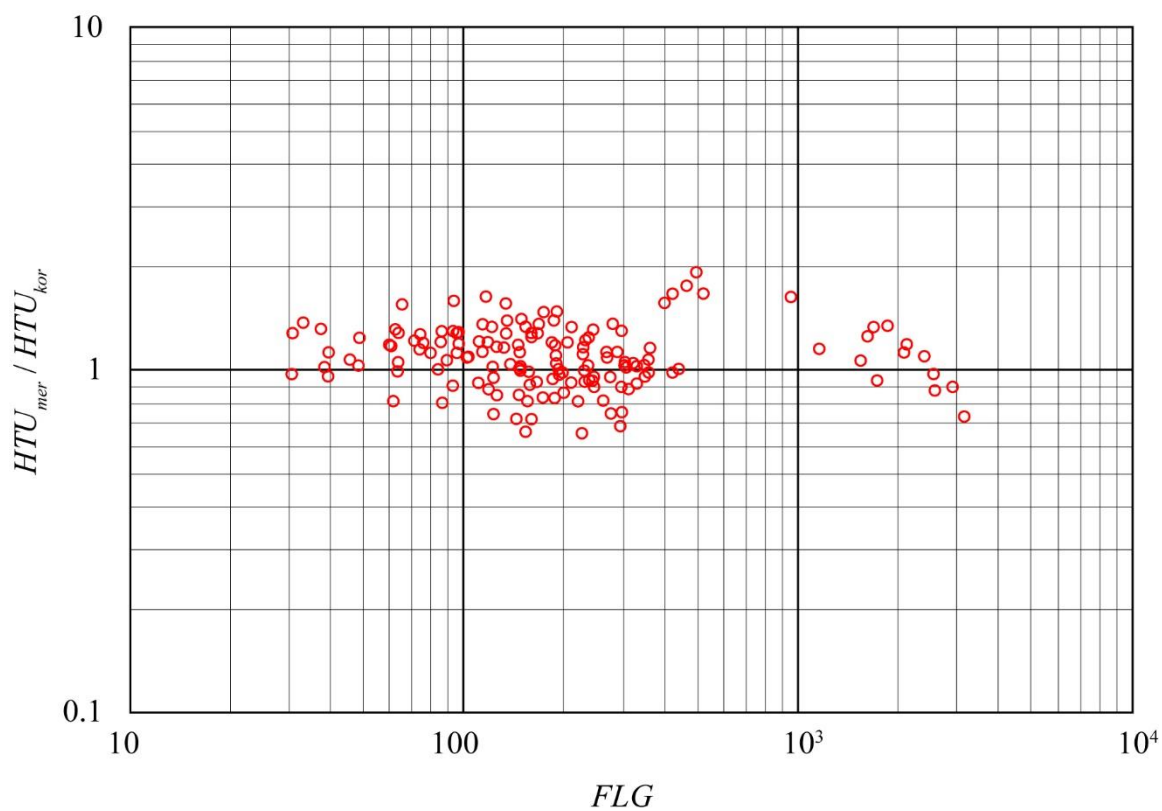


Слика 8.9 Паритетни дијаграм HTU

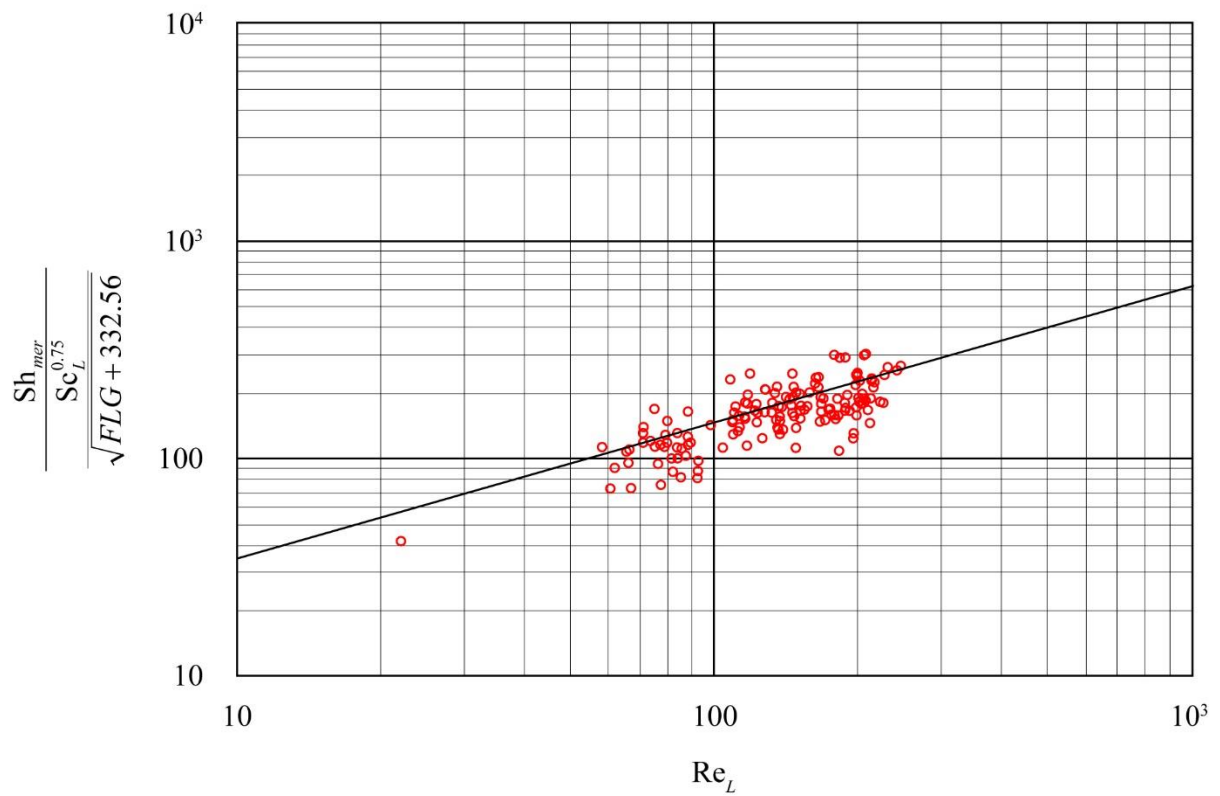
Поређење корелација из [19] и [20] са новопредложеном корелацијом (8.10) приказано је у табели 8.3.

Табела 8.3 Упоредни преглед корелација

Статистички параметар	Процедура из [20]	Процедура из [19]	Корелација (8.10)
Корелациони однос CR [%]	95,65	91,17	98,01
Стандардна девијација SD [%]	30,35	32,31	20,82
Максимална грешка RE_{max} [%]	68,39	73,75	49,06



Слика 8.10 Промена односа HTU у функцији од параметра FLG



Слика 8.11 Квалитет новопредложене корелације (8.10)

9 ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА

У процесном и енергетском инжењерству, један од фактора који значајно утиче на поузданост елемената односно постројења у целини јесте количина растворених гасова у процесној води, првенствено кисеоника који је основни узрочник неповољне појаве корозије. Операција уклањања гасова из хемијски припремљене воде назива се дегазација, односно деоксигенација уколико је намена операција првенствено уклањање кисоника.

Приликом контакта металних површина и раствореног кисеоника, долази до хемијске реакције и стварања продуката који формирају слојеве на металним елементима, најчешће оксида насталих услед реакције оксидације. На повишеним температурама, корозија је већег интензитета при чему се као последице јављају оштећења на цевоводима и опреми.

С обзиром на могућност настанка фаталних последица услед оштећења опреме корозијом, стандард SRPS EN 12952-10:2009 – Захтеви за квалитет напојне и котловске воде, дефинише максималну количину кисеоника раствореног у води и она износи $20 \mu\text{g/l} = 20 \text{ppb}_{\text{mas}}$. У циљу поштовања овог стандарда, а такође и смањења трошкова проузрокованих корозијом, модули за дегазацију односно деоксигенацију представљају саставни део постројења за припрему процесне воде.

У индустријској пракси дегазација може бити физичка, десорпција гасова из течности (термичка, мембранска, вакуумска, као и дегазација помоћу инертних гасова), и хемијска, познатија као каталитичка дегазација. У данашње време, због економичности и једноставности у односу на остале методе, вакуумска дегазација у колонама са испуном налази све ширу примену. И поред тога, размена супстанције у апаратима овог типа се сматра недовољно проученом.

С обзиром на чињеницу да размена супстанције у колонама са испуном при вакуумској дегазацији није довољно проучена у доступној литератури, предмет ове дисертације обухвата анализу сопствених мерења која су обављена на индустријском деоксигенатору, као и анализу досадашњих сазнања, како из доступне литературе, тако и сазнања насталих на Катедри за процесну технику Машинског факултета Универзитета у Београду, где се различити типови апарата и опреме проучавају тридесет година уназад. Процедура која је коришћена приликом обраде сопствених резултата мерења је аналогна оној која је објављена у [22].

У дисертацији је дат осврт на две, у инжењерској пракси, најзаступљеније процедуре за прорачун размене супстанције у колонама са испуном. Обе процедуре су доступне у отвореној литератури и приказане су у [19] и [20].

У одељку 8.4 је показано да обе наведене процедуре нису довољно прецизне за инжењерску праксу. Наиме, вредности коефицијената прелаза супстанције у течности (у гасној фази се отпори транспорта могу занемарити) су за већину тачака и обе процедуре већи од коефицијената добијених мерењем, што у пракси може довести до поддимензионисања колоне са испуном односно до недовољне висине слоја испуне за обављање операције при дефинисаном садржају кисеоника у води на излазу из колоне.

На основу обраде сопствених резултата мерења, која су обухватила укупно 150 радних режима приказаних у прилогу 2, формирана је оригинална корелација (8.10) за прорачун коефицијента прелаза супстанције у течности

$$Sh_L = 8,18 \cdot Re_L^{0,62} \cdot Sc_L^{0,75} \cdot \frac{1}{\sqrt{FLG + 332,56}}$$

Ова корелација даје знатно боље резултате у односу на методологије представљене у [19] и [20]. Такође, треба напоменути, да новопредложена корелација укључује параметар односа кинетичких енергија течности и гаса FLG чиме се обухвата утицај односа протока гасне и течне фазе на размену супстанције.

Научни методи примењени у изради дисертације су:

- математичко и физичко моделирање;
- експериментална истраживања;
- статистичка обрада резултата мерења;
- анализа резултата мерења.

Оригинални **научни допринос** ове докторске дисертације у проучавању деоксигенације у вакуумским колонама са огледа кроз следеће :

- извршено је моделирање топлотних перформанси бајонетног рекуператора топлоте вакуумског деоксигенатора – допринос је представљен у раду [24];
- формирана је прорачунска процедура за процену топлотних перформанси и запрљања загрејача улазне воде – допринос је представљен у раду [22];
- извршен је преглед доступних литературних извора који се односе на размену супстанције у колонама са испуном на основу чега су, за даљу анализу, издвојене две најрелевантније процедуре за прорачун овог типа апарата;
- извршено је поређење резултата добијених коришћењем одабраних процедура са резултатима сопствених мерења;
- на бази сопствених резултата мерења формирана је оригинална корелација за прорачун коефицијента прелаза супстанције у течности.

Поред научног, у дисертацији је остварен и **инжењерски допринос** који се огледа кроз следеће:

- дефинисана је процедура за димензионисање бајонетних размењивача топлоте – допринос је представљен у раду [24];
- дефинисана је метода за континуално праћење промене топлотних перформанси плочастог загрејача улазне воде - допринос је представљен у раду [22];
- формирана је прорачунска процедура колона са испуном које раде под вакуумом;
- добијена је оригинална корелација за прорачун коефицијента прелаза супстанције у течности код колона са испуном која се може користити како за димензионисање нових тако и за проверу постојећих апарата овог типа.

10 ЛИТЕРАТУРА

- [1] SRPS EN 12953-10:2009: *Захтеви за квалитет напојне и котловске воде*, Службени гласник 4/10, 2009.
- [2] Kunze, E., *Korrosion und Korrosionsschutz – Band 1: Einführung und wissenschaftliche Grundlagen*, Wiley – VCH, 2001.
- [3] Hoar, P., *Bericht des Komitees für Korrosion und Korrosionsschutz*, London, 1971.
- [4] Obzunt, J., *Iron Age*, 41, April, 1978.
- [5] Heitz, E., *Frankfurter Allgemeine Zeitung*, 20.11.1980.
- [6] Krüger, J., *Chem.-Ing.-Tech* 52, 1980.
- [7] van Laak, H., *Chem.-Ing.-Tech* 54, 1982.
- [8] Wranglen, G., *Korrosion und Korrosionsschutz – Band3:Grundlagen, Vorgänge, Schutzmaßnahmen, Prüfung*, Springer Verlag, 1985.
- [9] Dillon P., *Corrosion Handbook, No. 1: The Forms of Corrosion Recognition and Prevention*, NACE, Houston, 1982.
- [10] Shreir, L.L, Jarman, R.A., Burstein, G.T., *Corrosion 1: Metal/Environment Reactions*, 3rd edition, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2000.
- [11] <http://www.lenntech.com/ro/piping-corrosion.htm>
- [12] Corrosion - Volume I Metal/Environment Reactions Edited by L.L. Shreir, R.A. Jarman, G.T. Burstein, Butterworth-Heinemann Linacn House, Jordan Hill, Oxford, 2000
- [13] <http://www.cip.ukcentre.com/steam.htm>
- [14] NIST Chemistry WebBook, SRD 69.
- [15] Jaćimović, B., Genić, S., Stamenić, M., Reconsideration of enthalpy and entropy data and correlations for ammonia-water mixture up to 100bar AND 535°C, *International Journal of Refrigeration*, Vol.100, pp. 83-92, 2019.
- [16] Tanishita, I., Nagashima, A., Murai, Y., Correlation of Viscosity, Thermal Conductivity and Prandtl Number for Water and Steam as a Function of Temperature and Pressure, *Bulletin of JSME*, Vol. 14, No. 77, pp.1187-1198, 1971.
- [17] Јаћимовић, Б., Генић, С., *Дифузионе Операције и Апарати – Део 1: Основи Транспорта Сунстанције*, Машински Факултет Универзитета у Београду, Београд, 2007.
- [18] Јаћимовић, Б., Генић, С., *Дифузионе Операције и Апарати – Део 2: Дифузионе операције*, Машински Факултет Универзитета у Београду, Београд, 2010.
- [19] Onda K., Takeuchi H., Okumoto Y: Mass Transfer Coefficients Between Gas And Liquid Phases In Packed Columns, *Journal Of Chemical Engineering Of Japan*, Vol.1 No.1, 1968 pp 56-62
- [20] Billet, R., Schultes, M., Prediction of Mass Transfer Columns with Dumped and Arranged Packings, *Trans IChemE*, vol. 77, part A, pp. 498-504, 1999.
- [21] Gomez, V., Calculate Air Leakage Values for Vacuum Systems, *Chemical Engineering*, June 1991.

- [22] Genić, S., Jaćimović, B., Milovančević, U., Ivošević, M., Otović, M., Antić, M., Thermal performances of a “blackbox” heat exchanger in district heating systems, *Heat and Mass Transfer*, Vol. 54, pp. 867-873, 2017.
- [23] Billet, R., Packed Towers in Processing and Environmental Technology, *VCH*, 1995.
- [24] Ivošević, M., Petrović, A., Jaćimović, B., Genić, S., Thermal performances and their impact on design of bayonet - tube heat exchangers – single phase plug flow, *Heat and Mass Transfer*, vol. 55, issue 9, pp. 2391-2407, 2019.
- [25] Hobler, T., Mass Transfer and Absorbers, *Pergamon Press*, 1966.
- [26] Treybal, R., Mass Transfer Operations, *McGraw Hill*, 1981.
- [27] McCabe, W., Smith, J., Unit Operations of Chemical Engineering, *McGraw Hill*, 1976.
- [28] Coulson, J., Richardson, J., An Introduction to Chemical Engineering Design, *Pergamon Press*, 1983.
- [29] Schlünder, E., Einführung in die Wärme- und Stoffübertragung, *Vieweg*, 1972.
- [30] Onda, K., Takeuchi, H., and Okumoto, Y., Mass transfer coefficients between gas and liquid phases in packed columns, *Journal of Chemical Engineering of Japan*, vol. 1, pp. 56-62, 1968.
- [31] Dvorak, B., Lawler, D., Fair, J., Handler, N., Evaluation of the Onda Correlations for Mass Transfer with Large Random Packings, *Environmental Science & Technology*, Vol. 30, No. 3, pp. 945-953, 1996.
- [32] Sander, R., Compilation of Henry’s law constants (version 4.0) for water as solvent, *Atmospheric Chemistry and Physics*, Vol. 15, pp. 4399-4981, 2015.
- [33] Jaćimović, N., Genić, S., Jaćimović, B., Sizing of Packed Deaeration Columns, *Chemical Engineering & Technology*, Vol. 42, No. 00, pp. 1-9, 2019.
- [34] Takahashi, T., Fujita, K., A Correlation of Flooding Velocities in Countercurrent Gas-Liquid Contactors of Column Type, *Memoirs of the School of Engineering, Okayama University*, Vol. 2, No. 1, pp. 43-49, 1967.
- [35] Wang, G., Yuan, X., Yu, K., Review of Mass-Transfer Correlations for Packed Columns, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 44, pp. 8715-8729, 2005.

ПРИЛОЗИ

Прилог 1 Резултати мерења инфилтрације

Прилог 2 Резултати експерименталних мерења

Прилог 3 Одбачени радни режими

ПРИЛОГ 1 – РЕЗУЛТАТИ МЕРЕЊА ИНФИЛТРАЦИЈЕ

Р.Бр.	Притисак у деоксигенатору p_d [PaA]	Време записа притиска $\Delta\tau$ [s]
1	4300	10800
2	8400	10800
3	12500	10800
4	16400	10800
5	20100	10800
6	24100	10800
7	29000	10800
8	32400	10800
9	35200	10800
10	37800	10800
11	40200	10800
12	42300	10800
13	44200	10800

ПРИЛОГ 2 – РЕЗУЛТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИХ МЕРЕЊА

Р.бр.	\dot{L} [kg/h]	p_d [PaA]	t_L [°C]	\tilde{G}_{Gen} [kg/h]	$\tilde{x}_{A,k}$ [ppb _{mas}]
1	1190	9400	24,9	0,253	64,4
2	3300	10700	28,5	0,152	46,6
3	3300	10800	36,7	0,152	29,2
4	3400	10000	24	0,342	38,8
5	3400	10100	30,2	0,342	17,1
6	3400	10900	38,4	0,152	37,4
7	3500	8000	20,2	0	920
8	3600	8500	30,9	0,253	11,1
9	3600	7000	32,6	0,342	6
10	3600	7200	38	0,342	2,8
11	3600	9200	38,7	0,253	10,9
12	3600	10600	20,7	0,152	174,2
13	3700	9100	25,3	0,253	12,1
14	3700	9100	24,4	0,342	10,1
15	3700	9100	25,4	0,342	8,5
16	3700	7000	23,2	0,342	23
17	3700	7100	28,9	0,342	11,6
18	3700	9400	27,9	0,152	37,9
19	3700	9400	31,7	0,152	24,1
20	3700	9200	35,1	0,253	18,5
21	3700	6800	29,6	0,152	30,2
22	3700	6900	36,1	0,152	12,1
23	3700	10700	22,8	0,152	69,2
24	3700	11300	39,1	0,253	52,3
25	3700	8500	39	0	290
26	3800	8300	25,2	0,152	29,6
27	3800	8400	33,9	0,152	13,6
28	3800	8400	25,1	0,253	19,9
29	3800	8500	34,3	0,253	6,6
30	3800	9200	28,9	0,253	24,4
31	3800	9200	32,7	0,253	21,8
32	3800	6800	31,4	0,152	23,8
33	3800	11300	33,6	0,253	83,1
34	3900	8300	26,4	0,152	25,3
35	3900	10200	34	0,342	10,8
36	3900	10200	38,7	0,342	5,7
37	3900	10700	31,5	0,152	38
38	3900	11400	21,5	0,253	156
39	3900	11300	27,8	0,253	127,6
40	3900	8800	34	0	490
41	4000	5900	30,2	0,152	1,7
42	4000	7100	24,4	0,342	2,5
43	4000	8600	36,8	0,152	9,8

Р.бр.	\dot{L} [kg/h]	p_d [PaA]	t_L [°C]	\tilde{G}_{Gen} [kg/h]	$\tilde{x}_{A,k}$ [ppb _{mas}]
44	4000	8100	27,6	0,253	3,3
45	4000	10700	29,3	0,152	114,7
46	4000	8300	28	0	700
47	4100	5700	29,3	0,152	2
48	4100	6600	28,2	0,253	1,5
49	4100	7100	25,9	0,342	1,7
50	4100	10800	34	0,152	75,1
51	4300	6900	29,7	0,253	1,2
52	4300	8600	37,6	0,152	7,1
53	4300	9500	37,8	0,152	9,1
54	5300	9600	33,8	0,152	17,7
55	5300	9600	24,8	0,253	33,7
56	5400	9600	36,3	0,253	10,3
57	5500	11200	31,8	0,152	31
58	5500	11300	36,6	0,152	15,6
59	5500	9700	33,3	0,253	16,2
60	5700	6900	27,8	0,253	19,4
61	5700	9600	29	0,253	28,5
62	5700	10900	29,5	0,152	44,1
63	5800	9200	25	0,253	19,7
64	5800	11200	28,8	0,152	43
65	5900	8000	35	0,152	10,4
66	5900	9700	25,1	0,342	23,1
67	6000	7800	31,2	0,152	17,1
68	6000	11100	24,6	0,152	63,4
69	6000	11000	33,9	0,152	30
70	6100	9200	25,8	0,253	17,4
71	6100	6900	34,2	0,342	5,6
72	6100	11300	26,3	0,253	111,4
73	6200	6600	27,5	0,253	2,9
74	6200	7300	35,3	0,342	4,8
75	6200	7800	23,9	0,152	43
76	6200	7700	27,3	0,152	31,7
77	6200	6800	23,7	0,253	30,9
78	6200	8900	25,2	0,342	17,5
79	6200	6700	22,7	0,342	27,4
80	6200	9900	28,7	0,342	13,2
81	6200	9800	31,6	0,342	7,3
82	6200	9600	36	0,342	2,3
83	6200	11300	20,6	0,253	135,9
84	6200	11500	32,6	0,253	60,5
85	6200	11400	36,4	0,253	32,8
86	6300	6300	27,8	0,152	6
87	6300	7400	24,4	0,342	5,3
88	6300	7000	34,9	0,253	6,7

Р.бр.	\dot{L} [kg/h]	p_d [PaA]	t_L [°C]	\tilde{G}_{Gen} [kg/h]	$\tilde{x}_{A,k}$ [ppb _{mas}]
89	6300	8800	24,4	0,342	25,2
90	6300	6700	27	0,342	16,1
91	6300	6800	30,3	0,342	10,1
92	6300	7600	28,2	0	850
93	6300	7800	36	0	460
94	6400	6300	27,1	0,152	6,6
95	6400	6600	28,2	0,253	2,6
96	6400	7000	31,2	0,253	11,2
97	6400	10900	21,3	0,152	105
98	6400	10500	21,2	0,152	103,6
99	6400	7700	30,9	0	650
100	6500	10600	29	0,152	52,6
101	6500	10500	32,1	0,152	38,9
102	6600	10800	26,6	0,152	77,7
103	6600	10500	25,1	0,152	78,2
104	7500	8800	24,2	0,342	45
105	7600	7500	25,6	0,342	9,1
106	7600	6700	23,6	0,342	24,6
107	7600	11600	24,3	0,253	133,7
108	7700	10400	30,9	0,253	21,9
109	7700	10000	22,3	0,152	137,8
110	7700	11600	27,4	0,253	90,9
111	7700	7300	27,4	0	780
112	7800	7400	25,1	0,342	11,1
113	7800	9100	25,4	0,253	26,1
114	7800	8800	25,1	0,342	37,2
115	7800	10200	25,2	0,152	73,7
116	7800	7000	21,5	0	930
117	7900	10200	29,5	0,152	45,7
118	7900	7200	30,6	0	660
119	8000	9200	24,8	0,253	32,2
120	8000	10000	35	0,152	14,8
121	8000	10600	34	0,342	9,2
122	8000	10300	30,8	0,152	65,2
123	8000	10700	30,3	0,253	63,8
124	8100	10100	25,3	0,152	99,6
125	8200	6400	23,7	0,253	52
126	8200	10300	32,1	0,152	28,2
127	8200	10600	24,5	0,342	33,4
128	8200	11600	20,4	0,253	198,7
129	8300	10700	28	0,342	21,2
130	8400	6300	26,1	0,152	12,6
131	8400	6800	27,4	0,253	3,3
132	8400	6700	34	0,152	13,6
133	8400	6200	33,6	0,253	12,2

Р.бр.	\dot{L} [kg/h]	p_d [PaA]	t_L [°C]	\tilde{G}_{Gen} [kg/h]	$\tilde{x}_{A,k}$ [ppb _{mas}]
134	8400	5700	31,9	0,342	14,1
135	8400	10500	27,4	0,253	37
136	8400	10200	27,9	0,152	80,1
137	8500	6800	23,9	0,152	57,3
138	8500	6900	27,5	0,152	40,9
139	8500	10400	25	0,253	46,5
140	8500	6900	24,5	0	890
141	8600	6400	27,1	0,152	9,9
142	8600	6100	29,9	0,253	24,7
143	8600	5700	29,2	0,342	18,2
144	8600	10600	31,1	0,342	14,5
145	8700	6800	30	0,152	29,6
146	8700	6100	27,3	0,253	36,8
147	8700	10500	33,8	0,253	12,4
148	8800	5900	27,5	0,342	19
149	9000	6800	26,4	0,253	5
150	9400	6400	28,1	0,253	34,7
151	9400	6300	32,8	0,253	15,2
152	9600	6300	30,8	0,152	33,7
153	9600	6400	33	0,152	21,8
154	9600	6400	30,3	0,253	23,2
155	9600	8700	24	0,342	59,9
156	9700	6300	24,7	0,253	58,5
157	10000	8900	25,3	0,342	55,9
158	10200	6600	28,4	0,152	56,1
159	10200	9600	30,3	0,152	62,2
160	10200	9900	26,3	0,152	350
161	10200	6900	28,5	0	740
162	10300	8000	26,4	0,342	57,1
163	10400	7000	26,9	0,253	8,2
164	10400	6500	24,6	0,152	91,4
165	10400	9600	30	0,253	42,6
166	10400	10000	29	0,152	270
167	10500	6900	26,3	0,253	8,7
168	10500	7300	25,6	0,342	16,7
169	10500	6000	31,6	0,342	19,8
170	10500	9600	32,6	0,152	42,4
171	10500	9800	28,9	0,342	32,8
172	10600	9600	25	0,152	105,4
173	10600	7000	25,9	0	840
174	10700	6600	26,8	0,152	19,6
175	10700	7300	24,9	0,342	18,9
176	10700	9900	24,1	0,152	460
177	10800	6700	26	0,152	22,4
178	10800	6000	26,8	0,342	39,8

Р.бр.	\dot{L} [kg/h]	p_d [PaA]	t_L [°C]	\tilde{G}_{Gen} [kg/h]	$\tilde{x}_{A,k}$ [ppb _{mas}]
179	10800	9800	20,8	0,152	630
180	10900	5900	24	0,342	53,2
181	10900	6100	29,1	0,342	27,6
182	10900	9600	25,2	0,253	84
183	10900	9600	27,6	0,253	63,4
184	11000	9600	24	0,342	75,3
185	11000	6900	21,3	0	1000
186	11100	6900	23,4	0	960
187	11300	9600	28,4	0,152	83,3
188	11300	9800	32,1	0,253	30,2
189	11400	9800	30,8	0,342	27,5

ПРИЛОГ 3 – ОДБАЧЕНИ РАДНИ РЕЖИМИ

Р.бр.	\dot{L} [kg/h]	P_d [PaA]	t_L [°C]	\dot{G}_{Gen} [kg/h]	$x_{A,k,mer}$ [ppbmas]	$x_{A,k,min}$ [ppbmas]
1	4100	5700	29,3	0,152	2	7,7185
2	4000	5900	30,2	0,152	1,7	7,5325
3	4100	6600	28,2	0,253	1,5	8,2911
4	4300	6900	29,7	0,253	1,2	7,9634
5	4000	7100	24,4	0,342	2,5	9,615
6	4100	7100	25,9	0,342	1,7	8,7134
7	3800	8400	33,9	0,152	13,6	13,8691
8	4000	8600	36,8	0,152	9,8	10,2252
9	4300	8600	37,6	0,152	7,1	8,9395
10	3600	8500	30,9	0,253	11,1	11,5778
11	3800	8500	34,3	0,253	6,6	8,4362
12	3700	9100	25,3	0,253	12,1	18,4335
13	4000	8100	27,6	0,253	3,3	13,315
14	3700	9100	24,4	0,342	10,1	14,3813
15	3700	9100	25,4	0,342	8,5	13,7027
16	5300	9600	33,8	0,152	17,7	19,4178
17	4300	9500	37,8	0,152	9,1	12,4535
18	3900	10200	38,7	0,342	5,7	6,3851
19	6400	6300	27,1	0,152	6,6	13,3999
20	6300	6300	27,8	0,152	6	12,5155
21	6200	6600	27,5	0,253	2,9	8,8488
22	6400	6600	28,2	0,253	2,6	8,2911
23	6300	7400	24,4	0,342	5,3	10,3299
24	5900	8000	35	0,152	10,4	10,4165
25	6100	9200	25,8	0,253	17,4	18,2917
26	5500	11300	36,6	0,152	15,6	22,2459
27	6200	9900	28,7	0,342	13,2	13,2386
28	6200	9800	31,6	0,342	7,3	10,9461
29	6200	9600	36	0,342	2,3	7,2983
30	8400	6300	26.1	0,152	12,6	14,6532
31	8600	6400	27.1	0,152	9,9	13,8959
32	9000	6800	26.4	0,253	5	10,3342
33	8400	6800	27.4	0,253	3,3	9,5349
34	7600	7500	25.6	0,342	9,1	9,8299
35	8000	10000	35	0,152	14,8	19,2649
36	8700	10500	33.8	0,253	12,4	14,4453
37	8000	10600	34	0,342	9,2	10,8441
38	10500	6900	26.3	0,253	8,7	10,7237
39	10400	7000	26.9	0,253	8,2	10,5486

БИОГРАФИЈА АУТОРА

Милош Ивошевић рођен је у Београду 08.06.1987. Основну школу „Душко Радовић“ завршио је 2002. године у Београду. Средњу школу „10. београдску гимназију“ завршио је 2006. године у Београду. Основне студије на Машинском факултету Универзитета у Београду уписао је 2006. године и завршио 2013. године. Мастер студије на Машинском факултету Универзитета у Београду, смер Процесна техника и заштита животне средине, уписао је 2010. године и завршио 2013. године са просечном оценом 9,35. Мастер рад је одбранио са оценом 10 на тему „Систематизација експерименталних података за прелаз топлоте на оребреним цевима“ под вођством професора Србислава Генића.

Од 2011. године је сарадник фирме „Numikon“ из Загребa где је учествовао на реализацији више пројеката из области чврстоће цевовода, посуда под притиском и конструкције процесне опреме.

2011. године обавио је праксу на институту “Paul Scherrer” у Швајцарској, где се бавио истраживачким радом из области струјања флуида и транспорта топлоте.

Од 2014. до 2015. године био је запослен у фирми “Engineering Dobersek” из Мунхенгладбаха као конструктор и пројектант процесних постројења.

Награђен је за изузетан успех током студија на Машинском факултету 2010/11. године.

Запослен је од 2015. године као асистент на Машинском факултету Универзитета у Београду.

Кандидат говори енглески, немачки и италијански језик. Служи се руским језиком. Активно користи програмерске софтвере Visual Basic, MatLab, Python, Ansys, Aspen, ChemCAD, OriginPRO, NITLabView, Caesar II, PVElite. Такође напредни је корисник софтверског пакета MS OFFICE (Word, Excell, Power point) и Latex, софтвера за техничко цртање AutoCAD, Solid Works, AutoCAD Plant 3D, CadWorx, Inventor. Аутор је више програма за инжењерске прорачуне.

Изјава о ауторству

Име и презиме аутора: Милош Ивошевић

Број индекса: Д29/13

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом:

„Процесне перформансе колоне са испуном при вакуумској дегазацији воде“

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

У Београду, 25.06.2020.

Потпис аутора

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора: Милош Ивошевић

Број индекса: Д29/13

Студијски програм: Процесна техника

Наслов рада: „ Процесне перформансе колоне са испуном при вакуумској дегазацији воде “

Ментор: проф. др Србислав Генић, редовни професор, Универзитет у Београду, Машински факултет

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао ради похрањивања у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**. Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада. Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

У Београду, 25.06.2020.

Потпис аутора

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

„ Процесне перформансе колоне са испуном при вакуумској дегазацији воде “

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
- ③ Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

У Београду, 25.06.2020.

Потпис аутора

1. **Ауторство.** Дозвољава се умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.
2. **Ауторство – некомерцијално.** Дозвољава се умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.
3. **Ауторство – некомерцијално – без прерада.** Дозвољава се умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.
4. **Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима.** Дозвољава се умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.
5. **Ауторство – без прерада.** Дозвољава се умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.
6. **Ауторство – делити под истим условима.** Дозвољава се умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.