

Универзитет у Београду
Машински факултет

мр Бранка Б. Раданов, дипл.инж.маш.

**ИСТРАЖИВАЊЕ РАДНИХ ПАРАМЕТАРА
КОНТАКТНОГ КОНДЕНЗАТОРА –
ДЕГАЗАТОРА СА КОНТИНУАЛНИМ
КОНТАКТОМ ФАЗА ЗА ПРИПРЕМУ ВОДЕ ЗА
СИСТЕМЕ ДАЉИНСКОГ ГРЕЈАЊА**

Докторска дисертација

Београд, 2016. година

**Faculty of Mechanical Engineering
University of Belgrade**

mr Branka B. Radanov,dipl.ing.mech.

**RESEARCH ON WORKING PARAMETERS OF
DIRECT CONTACT DEAERATOR FOR DISTRICT
HEATING WATER**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2016

*Докторску дисертацију посвећујем мојој деци Василиси
и Вуку*

Захвалница

Овај рад је настао после вишегодишњег истраживања на Машинском факултету Универзитета у Београду. Велику захвалност и поштовање дугујем ментору професору др Браниславу Јаћимовићу и професору др Србиславу Генићу који су својим великим знањем, ауторитетом, стручношћу и професионалношћу у највећој мери омогућили да обликујем и реализујем истраживање у овој докторској дисертацији у периоду од јуна 2011 године до септембра 2016 године.

Веома сам захвална мојим родитељима Ангелини Јовић и Бранку Јовићу као и мојој породици, деци Василиси и Вуку и супругу Жељку на подршци да истрајем до краја у намери да успем у овом подухвату. Нарочито се захваљујем институцији Дирекцији за мере и драгоцене метале на указаном поверењу и финансијској подршци а специјално руководству Дирекције за мере и драгоцене метале које је знало да препозна значај оваквог подухвата.

Велику захвалност дугујем колегиници др Мирјани Стаменић која ми је помогла несебично својим знањем и својом стручношћу. Такође велику захвалност дугујем др Ненаду Нешићу као и др Милицу Ковачевић Миливојевић који су ми помогли да користим стручну литературу доступну на Швајцарском и Холандском универзитету.

Захвална сам целом тиму катедре Процесна Техника на указаној подршци у виду лабораторијског простора као и постављања и коришћења мерне инсталације.

Захвалност и поштовање дугујем и др Александру Јововићу као и др Ђорђу Чантраку који су својим стручним и добронамерним саветима допринели да истрајем у овом веомо дугом и обимном пројекту. Веома сам захвална и сестри Јелени Јовић Лаботић, помоћнику правобраниоца као и професору др Сави Смиљићу који су ме подржавали све време у току израде докторске дисертације.

ИСТРАЖИВАЊЕ РАДНИХ ПАРАМЕТАРА КОНТАКТНОГ КОНДЕНЗАТОРА – ДЕГАЗАТОРА СА КОНТИНУАЛНИМ КОНТАКТОМ ФАЗА ЗА ПРИПРЕМУ ВОДЕ ЗА СИСТЕМЕ ДАЉИНСКОГ ГРЕЈАЊА

Апстракт

У раду је приказана анализа контактне кондензације на слободно формираном млазу, у контактном кондензатору без испуне. Такође, дат је критички осврт на отворене литературне изворе. Након поређења експерименталних података и корелација из отворених литературних извора, закључено је да објављене корелације, не омогућавају довољно прецизну анализу резултата. С обзиром да корелације из отворених литературних извора не одговарају експерименталним подацима, формирана је и постављена нова корелација која је у функцији бездимензионих параметара. Такође, разматран је и распад млаза течности, формирање капи, гранични услови као и феномени кондензације паре на слободно формираном млазу течности. Научни допринос докторске дисертације је нови математички модел односно постављање нове критеријалне једначине.

Кључне речи: Термички дегазатор, континуални контакт фаза, коефицијент прелаза топлоте, распад млаза течности, кондензација паре на млазу течности.

Научна област: Машинство
Ужа научна област: Процесна техника
УДК број: 621.182.1 (043.3)
66.021.4:66.069.84 (043.3)

RESEARCH ON WORKING PARAMETERS OF DIRECT CONTACT DEAERATOR FOR DISTRICT HEATING WATER

ABSTRACT

The dissertation investigates analysis the research results of direct contact condensation of steam on freely formed falling liquid jets in a contact condenser. After the comparison of experimental data and open literature correlations it was concluded that published correlations does not provide accurate coverage of experimental data. Given that correlation from open literature sources do not correspond to the experimental data, new correlation was formed and established. A new correlation is a function of dimensionless parameters. It was also considered the breakup of the liquid jet, forming of the drops, boundary conditions, as well as, phenomena of condensation of the steam on freely formed falling liquid jets. In this respect, the scientific contribution of the doctoral dissertation is a new mathematical model and a establishment of a new criterial equation.

Key words: Thermal deaerator, continual phase contact, coefficient of heat transfer, breakup of liquid jet, vapor condensation on the liquid jet.

Scientific Field: Mechanical Engineering

Area: Process Engineering

UDC: **621.182.1 (043.3)**

66.021.4:66.069.84 (043.3)

САДРЖАЈ

1	УВОДНА РАЗМАТРАЊА	1
2	ПРЕГЛЕД КОНСТРУКЦИОНИХ РЕШЕЊА ДЕГАЗАТОРА И МОДЕЛИРАЊЕ ПРОЦЕСНИХ ФЕНОМЕНА КОД КОНТАКТНИХ КОНДЕНЗАТОРА	3
2.1	Примена дегазатора у енергетици	4
2.2	Примена дегазатора у процесној индустрији	4
2.3	Термичка дегазација воде	6
2.4	Моделирање процесних феномена у контактним кондензаторима	10
2.5	Број јединица преноса	15
2.6	Коефицијент прелаза топлоте	17
3	ПРЕГЛЕД ЛИТЕРАТУРНИХ ИЗВОРА	21
3.1	Гравитационо истицање течности кроз отворе	21
3.1.1	Гравитационо истицање течности кроз отворе и формирање млаза	22
3.1.2	Распад млаза и формирање капи течности	25
3.1.3	Онезоргова класификација фрагментације млаза	27
3.2	Прелаз топлоте при кондензацији паре на течном млазу	29
4	ОПИС ЕКСПЕРИМЕНТАЛНЕ ИНСТАЛАЦИЈЕ И ПОСТУПКА МЕРЕЊА	38
4.1	Опис експерименталне инсталације	38
4.2	Поступак мерења	43
4.3	Стационарност радног режима	46

5	АНАЛИЗА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИХ РЕЗУЛТАТА	50
5.1	Статистички параметри	50
5.2	Сопствена мерења	51
5.3	Подаци из отворене литературе	52
5.4	Својства флуида	53
5.5	Поређење експерименталних података и корелација из отворене литературе	53
5.6	Нова корелација за израчунавање коефицијента прелаза топлоте у течности	58
5.7	Преглед конструкционих карактеристика дегазатора	62
6	ЗАКЉУЧАК	69
7	ПРИЛОЗИ – РЕЗУЛТАТИ МЕРЕЊА	74
	Прилог 1 – Резултати мерења на колони DN300	75
	Прилог 2 – Резултати мерења на колони DN900	88
	Прилог 3 – Резултати мерења на колони DN900	90
	Прилог 4 – Резултати мерења на колони DN1800	92
	БИОГРАФИЈА	94

СПИСАК ТАБЕЛА

Табела 2.1 Основне карактеристике поступака деоксигенације воде

Табела 3.1 Параметри у (3.20)

Табела 3.2 Опсег радних и конструкционих параметара за корелације из литературе

Табела 5.1 Основни подаци у вези са примарним загревањем сока

Табела 5.2 Статистички параметри корелација из литературе

Табела 5.3 Опсег различитих параметара за корелацију (5.20)

Табела 5.4 Статистички параметри нове корелације (5.20)

Табела 5.5 Зависност NTU_L од H_{LG} – по три карактеристичне вредности су груписане ради илустрације феномена

СПИСАК СЛИКА

Слика 2.1 Основни типови термичких дегазатора

Слика 2.2 Комбиновани поступак за дегазацију

Слика 2.3 Шематски приказ апарата

Слика 3.1 Истицање течности кроз мали кружни отвор оштрих ивица

Слика 3.2 Формирање капи течности према [3.13]

Слика 3.3 Формирање лигамената и капи течности

Слика 4.1 Шематски приказ инсталације

Слика 4.2 Шематски приказ дегазационе колоне

Слика 4.3 Фотографија дегазационе колоне

Слика 4.4 Дегазациона колона при нестабилном раду

Слика 5.1 Експериментални подаци – веза између броја јединица преноса и односа кинетичких енергија

Слика 5.2 Корелационо поље за (3.20)

Слика 5.3 Корелационо поље за (3.26)

Слика 5.4 Корелационо поље за (3.29)

Слика 5.5 Корелација (5.20) и експериментални подаци – испрекидане линије приказују корелационо поље од $\pm 30\%$

СПИСАК ОЗНАКА И КОРИШЋЕНЕ ЛИТЕРАТУРЕ

Списак ознака и коришћене литературе су дати за свако поглавље на његовом крају.

1 УВОДНА РАЗМАТРАЊА

Основна опрема која се у процесној индустрији користи за обављање технолошких процеса (процеса трансформације полазног материјала у финални производ) се може разврстати у апарате и машине и помоћну опрему. Апарати припадају групи уређаја у којима се остварују одређене технолошке операције првенствено услед кретања радних медијума кроз сам уређај, деловања радних медијума једних на друге и евентуалне размене енергије (топлоте или механичког рада) која се доводи (одводи) радним медијумима. Апарати у којима се остварује непосредни контакт између гаса, односно паре, и течности се користе за технолошке операције у којима долази до размене супстанције и/или топлоте. То су пре свега дифузионе и топлотне (дестилација, ректификација, апсорпција, десорпција, загревање, кондензација, влажење, сушење, итд.), али и хидромеханичке и хемијске операције. Све ове операције се могу обављати у апаратима типа колоне, чија је основна карактеристика да им је попречни пресек мали у односу на висину. Колоне могу имати степени или континуални контакт фаза.

При избору и димензионисању колоне треба водити рачуна о једноставности конструкције, тако да трошкови израде, монтаже и експлоатације колоне буду што мањи, наравно уз услов да колоне оствари захтевану технолошку операцију на задовољавајући начин. Да би се ови захтеви задовољили, односно да би се олакшао избор и процедура димензионисања апарата, потребно је располагати довољно поузданим подацима о раду различитих конструкционих решења у широком дијапазону радних услова.

На Катедри за процесну технику Машинског факултета Универзитета у Београду се дуже од 35 година врше истраживања радних параметара различитих типова колона. У последњих 15–ак година извршена су испитивања дегазатора са сегментним подовима као и ситастим подовима без преливног уређаја, те дегазатора са испуном од Палових прстенова. Истраживања су вршена у ради одређивања интензитета размене топлоте односно супстанције и у области флуидодинамичких параметара рада колона и објављена су у водећим међународним часописима.

Настављајући научно–истраживачки рад у овој области, у оквиру ове докторске дисертације је проучен и анализиран рад дегазационе колоне са континуалним контактом фаза за термичку припрему воде за допуну система даљинског грејања. Истраживања су вршена у колони са слободно формираним млазевима течне фазе ради одређивања интензитета размене топлоте. С обзиром да понашање колоне овог типа у литератури није довољно добро проучено, циљ докторске дисертације је да се утврде поуздане једначине којима би се рад оваквих апарата могао описати, односно дефинисање поуздане прорачунске процедуре за димензионисање нових колона, као и за контролне прорачуне постојећих колона.

2 ПРЕГЛЕД КОНСТРУКЦИОНИХ РЕШЕЊА ДЕГАЗАТОРА И МОДЕЛИРАЊЕ ПРОЦЕСНИХ ФЕНОМЕНА КОД КОНТАКТНИХ КОНДЕНЗАТОРА

У постројењима процесне индустрије и енергетике вода се користи као процесна вода или третирана вода. Термин процесна вода означава воду за општу употребу у постројењу. То може бити вода која ће се користити директно у технолошком процесу, али и вода за одржавање хигијене или друге намене.

Свежа (сирова) вода садржи одређену количину растворених соли (претежно су то соли калцијума и магнезијума), као и одређену количину растворених гасова. Нетретирана вода се у већини постројења не може користити без претходног физичког и хемијског третмана уз који се вода ослобађа соли и гасова. Такође, одређени технолошки процеси захтевају да процесна вода буде посебно припремљена. Из наведених разлога се врши хемијски и физички третман свеже воде (декарбонизација, деминерализација, деоксигенација) ради припреме напојне воде за котловска и процесне воде и водених раствора за технолошка постројења.

Дегазација (деаерација) је технолошка операција у току које се спроводи издвајање растворених гасова из течности, најчешће из воде и водених раствора. Ова операција је од велике важности у енергетици и процесним индустријама. Операција се обавља у апаратима који се називају дегазатори, код којих се користи један или више поступака:

- снижење притиска – вакумска дегазација;
- загревање течности – термичка дегазација;

- селективно растварање гасова у мембранама – мембранска дегазација;
- десорпција у присуству инертног гаса;
- хемијска реакција кисеоника са редуктантима.

2.1 ПРИМЕНА ДЕГАЗАТОРА У ЕНЕРГЕТИЦИ

Квалитет напојне воде, односно одговарајућа хемијска и физичка припрема воде су основни предуслов за безбедан и економичан рад котлова и система даљинског грејања. У јоноизмењивачким колонама из свеже (сирове) воде уклањају се катјони и анјони до одређеног захтеваног нивоа, при чему се степен тврдоће своди на потребан ниво, а концентрација појединих растворених материја у току рада котловског постројења периодично контролише и поступком одмуљења и одсољења котла своди на захтевани ниво.

Посебан проблем код напојне котловске воде и воде за допуну система даљинског грејања се тиче издвајања растворених гасова из воде и то пре свега кисеоника и угљендиоксида који су опасни због корозије. У пракси физички поступци дегазације воде се свде на десорпционе поступке као што су: термичка дегазација и дегазација мембранским поступком. У хемијске поступке спадају хемијске реакције кисеоника и погодних реагенаса (скевенцера – scavenger), као и каталитичке реакције. Постојећи поступци имају карактеристике наведене у табели 2.1.

2.2 ПРИМЕНА ДЕГАЗАТОРА У ПРОЦЕСНОЈ ИНДУСТРИЈИ

У процесним постројењима дегазација се примењује за уклањање гасова (кисеоник, азот, угљендиоксид, сумпордиоксид, итд.) из течности пре улаза у процесне системе који укључују дестилационе колоне, упаривачке станице, итд. Наиме, растворени гасови се на повишеној температури издвајају из течности и представљају озбиљну

Табела 2.1 Основне карактеристике поступака деоксигенације воде

Поступак	Предност	Недостатак
Термичка дегазација	Добро познат поступак Велики број произвођача одговарајуће опреме	Неповољна цена поступка Неопходан извор топлоте (водене паре) Неопходан накнадни третман помоћу хемијских средстава
Мембранска дегазација	Повољна цена поступка	Мали број произвођача мембрана Захтева се значајна филтрација воде због заштите мембрана Компликовано одржавање мембрана Проблем старења и честе замене мембрана
Хемијска дегазација	Добро познат поступак Велики број произвођача скевенџера	Неповољна цена поступка Рад са материјалима опасним по здравље
Каталитичке реакције	Повољна цена поступка	Мали број произвођача каталитичких испуна Захтева се предтретман воде тако да она не садржи живу, кадмијум, сулфиде, хуминску киселину, итд. Неопходан је извор водоника за процес што поставља проблем безбедности Честе замене испуне у реактору
Вакумска дегазација	Најповољнија цена поступка Није потребан посебни претходни третман воде	Условни недостатак је неверица корисника до пуштања у рад прве индустријске инсталације

баријеру за интензивни транспорт топлоте и/или супстанције. Због тога се различите тености, као што су шећерни и воћни сирупи, вински талог, итд., пре основне операције (упаравања, дестилације) загревају у дегазаторима да би се извршило издвајање контролисано гасова и тиме смањио њихов садржај у течности.

2.3 ТЕРМИЧКА ДЕГАЗАЦИЈА ВОДЕ

При термичкој дегазацији десорпција растоверних гасова се остварује помоћу загревања воде. Загревање воде за потребе термичке дегазације може да се врши на два начина:

- у рекуперативним размењивачима топлоте или
- у контактним размењивачима топлоте.

Због већег степена десорпције повољнији је други поступак (загревање у контактним размењивачима топлоте) који се због тога и чешће примењује. Један такав поступак је директно мешање воде са воденом паром. Овај поступак често налази примену у термоенергетским постројењима и у системима даљинског грејања (генерално у процесима у којима се производи водена пара). Како у највећем броју случајева применом овог поступка није могуће да се оствари потпуно одстрањивање кисеоника из воде, најчешће се примењује у комбинацији са додатним одговарајућим хемијским методима. У погледу варијације количине, односно протока, воде која се третира у поступку, овај поступак је веома флексибилан.

Поред основне сврхе постоје и индиректне користи поступка термичке дегазације:

- вода се у котловима загрева и испарава тако да је термичка дегазација (без рекуперације) врло погодна за котлове који производе технолошку пару;
- вода улази у катао на повишеној температури што смањује ризик од топлотних шокова уређаја;
- за дегазацију се може користити отпадна пара (нпр. отпарак од одсољавања и одмуљивања котла) што омогућава уштеду енергије.

Подела дегазатора може да се врши на основу више критеријума. Према [2.1], дегазатори могу да се разврстају према радном притиску на:

- вакумске (притисак у апарату нижи од атмосферског);
- атмосферске (притисак у апарату $1,2 \div 1,7 \text{ barA}$);
- на повишеном притиску (притисак у апарату $1,7 \div 7 \text{ barA}$).

Према [2.2], [2.3], [2.4] дегазатори се могу поделити на:

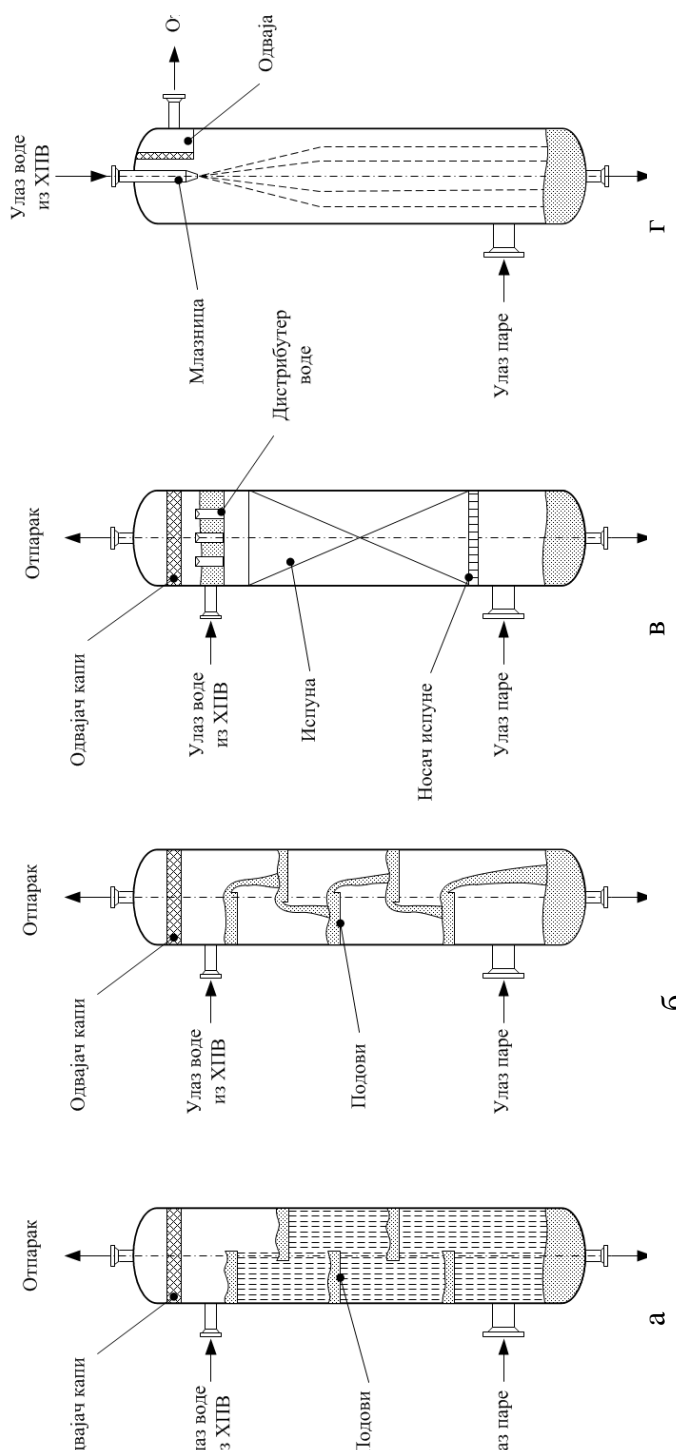
- колоне са подовима (слика 2.1а и 2.1б);
- колоне са испуном (слика 2.1в);
- колоне са млазницама (слика 2.1г).

Колоне са подовима се најчешће израђују у две основне варијанте: колоне са ситастиим подовима (слика 2.1а) и колоне са подовима са прелазном браном (слика 2.1б).

Поред колона, данас је све више у употреби хоризонтални резервоар у који се пара уводи преко млазнице (тзв. steam jet деаератор). На тај начин се у апаратима овог типа остварује барботажа паре кроз слој воде.

Веома често примену налази и комбиновани поступак за дегазацију, у коме се примарна дегазација остварује у дегазационој колони, а сабирни хоризонтални резервоар је снабдевен млазницама за пару (слика 2.2). у резервоару се врши додатна дегазација заосталих гасова, као и таложење издвојених соли. Како је резервоар обично димензионисан за потребе котловског постројења, уобичајено је да се назива напојни резервоар. Уколико се у сабирном резервоару испод дегазационе колоне не обавља барботажа паре, време задржавања воде у њему је према [2.1] ограничено на 15 минута због могуће поновне контаминације воде гасовима који су десорбовани.

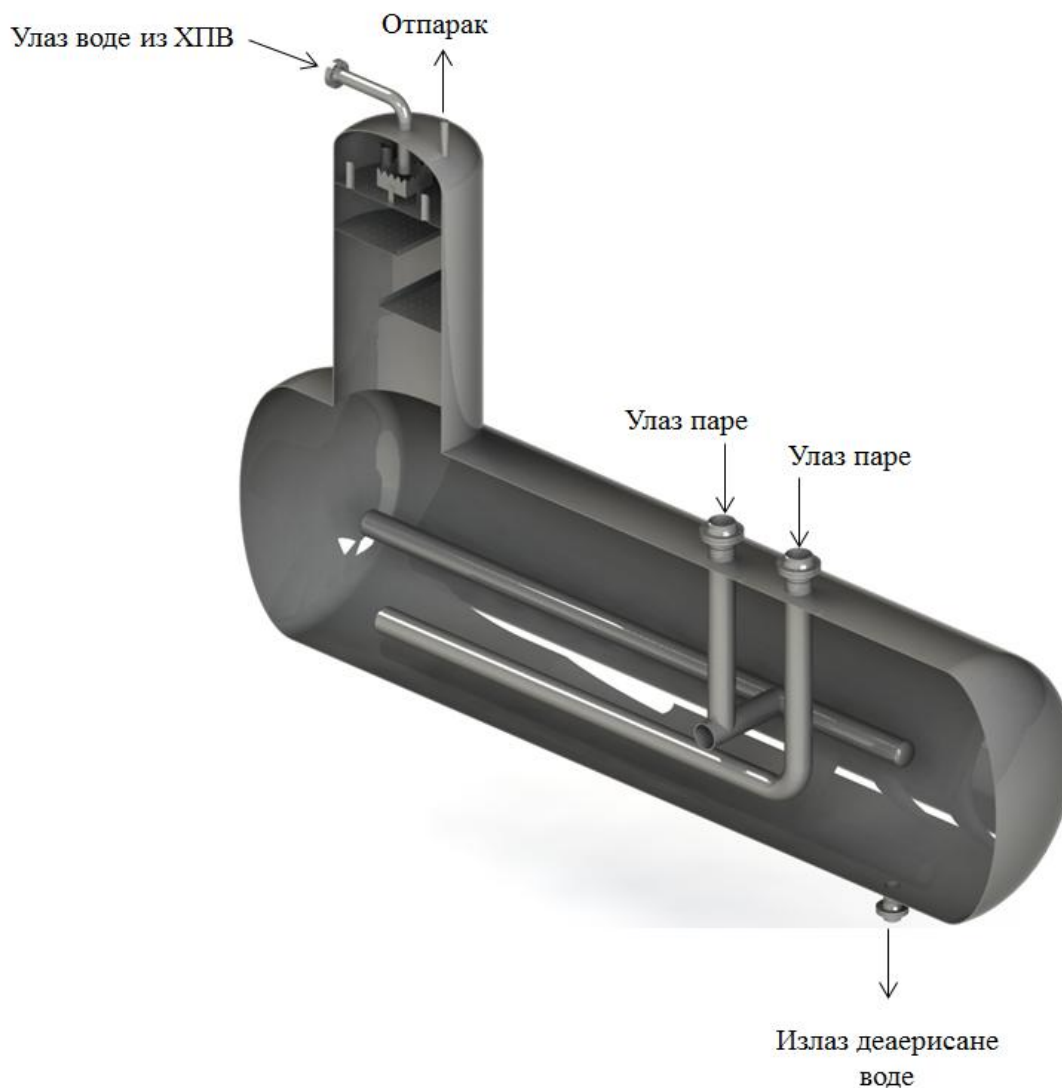
Приликом термичке дегазације, вода се ослобађа свих растоврених гасова, при чему се угљен–диоксид практично у потпуности десорбује. Са друге стране, у зависности од конструкционог решења и радних услова, ниво кисеоника се обично снижава на $7 \div 40 \text{ ppb(mas)}$ [2.5].



Слика 2.1 Основни типови термичких дегазатора

Кисеоник који остаје растворен у води након процеса термичке дегазације се уклања у процесу хемијске дегазације, додавањем одређених хемијских средстава (тзв. oxygen scavenger–а) који се додају или у напојни резервоар или у цевовод. Због ограниченог

степен издвајања кисеоника из воде, према [2.6] скевенџери се успешно употребљавају када је концентрација кисеоника у води мања од 50ppb(mas).



Слика 2.2 Комбиновани поступак за дегазацију

2.4 МОДЕЛИРАЊЕ ПРОЦЕСНИХ ФЕНОМЕНА У КОНТАКТНИМ КОНДЕНЗАТОРИМА

На улазу у апарат пара може да буде преграјана, сувозасићена или влажна. У општем случају, са стране паре се размењује и латентна и осетна топлота. Како је количина

латентне топлоте вишеструко већа од количине осетне топлоте која се размени, у даљој анализи ће да буде разматрана само латентна топлота са стране сувозасићене паре.

Приликом пролазак кроз апарат, део целокупне флуидне струје се троши на савладавање отпора струјању. Уколико може да се сматра да је овај губитак енергије занемарљиво мали у односу на размењену количину топлоте (што је у пракси оправдана претпоставка), из ове две апроксимације могу да се изведу следећа два закључка битна за праксу:

- промена укупне специфичне енергије једнака је промени специфичне енталпије флуидне струје, односно једначина енергетског биланса се своди на једначину топлотног биланса;
- притисак у апарату је константан, односно притисак паре на улазу у апарат P_{kond} (P_a) дефинише температуру кондензације, као и радни притисак у апарату.

Ради упрошћења модела, у даљој анализи ће да се сматра да термофизичка својства фаза могу са довољном тачношћу да се одреде као осредњене вредности својстава у опсегу промене радних температура. Поред тога, сматра се да је губитак топлоте у околину занемарљив.

Иако се дегазатори димензионишу тако да се целокупна количина паре која се уведе у апарат и искондензује, ради опште примене математички модел ће да садржи и члан који се односи на проток паре на изласку из апарата.

Сматраће се да апарат ради у стационарном радном режиму, односно да се улазни параметри протоци флуида не мењају у времену, односно да имају константне вредности.

Уколико је све горе наведено испуњено, могу да се поставе следеће једначине масеног и енергетског биланса за контуру K на слици 2.3

$$\dot{m}_{Lp} + \dot{m}_{Gp} = \dot{m}_{Lk} + \dot{m}_{Gk} \quad (2.1)$$

$$\dot{m}_{Lp} \cdot c_L \cdot t_{Lp} + \dot{m}_{Gp} \cdot h_{Gp} = \dot{m}_{Lk} \cdot c_L \cdot t_{Lk} + \dot{m}_{Gk} \cdot h_{Gk} \quad (2.2)$$

где су:

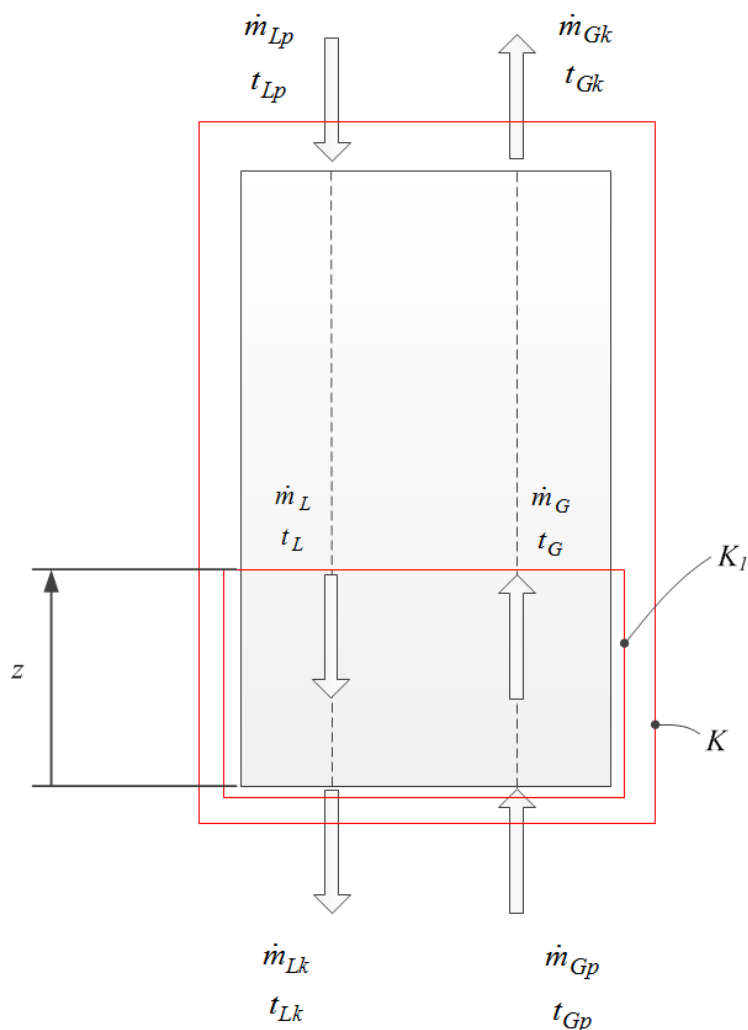
- \dot{m}_{Lp} , kg/s , масени проток течности на улазу у апарат;
- \dot{m}_{Lk} , kg/s , масени проток течности на излазу из апарата;
- \dot{m}_{Gp} , kg/s , масени проток паре на улазу у апарат;
- \dot{m}_{Gk} , kg/s , масени проток паре на излазу из апарата;
- c_L , J/(kg·K), средњи специфични топлотни капацитет течности;
- t_{Lp} , °C, температура течности на улазу у апарат;
- t_{Lk} , °C, температура течности на излазу из апарата;
- h_{Gp} , J/kg, специфична енталпија паре на улазу у апарат;
- h_{Gk} , J/kg, специфична енталпија паре на излазу из апарата.

На основу билансних једначина (1.1) и (1.2) добија се следећа веза

$$\dot{m}_{Lp} \cdot [c_{pL} \cdot (t_{Lp} - t_{kond}) - \Delta h_{LG}] = \dot{m}_{Lk} \cdot c_{pL} \cdot t_{Lk} + (\dot{m}_{Gp} - \dot{m}_{Lk}) \cdot h_{Gk} - \dot{m}_{Gp} \cdot h_{Gp} \quad (2.3)$$

где су:

- t_{kond} , °C, температура кондензације паре на притиску p_{kond} ;
- Δh_{LG} , J/kg, латентна топлота промене фазе на притиску p_{kond} .



Слика 2.3 Шематски приказ апарата

Поред једначина за цео апарат, једначине масеног и топлотног биланса могу да се поставе и за произвољни пресек у апарату (контура K_1 на слици 2.3). У том случају, билансне једначине постају

$$\dot{m}_L + \dot{m}_{Gp} = \dot{m}_{Lk} + \dot{m}_G \quad (2.4)$$

$$\dot{m}_L \cdot c_L \cdot t_L + \dot{m}_{Gp} \cdot h_{Gp} = \dot{m}_{Lk} \cdot c_L \cdot t_{Lk} + \dot{m}_G \cdot h_G \quad (2.5)$$

где су:

- \dot{m}_L , kg/s, масени проток течности у произвољном пресеку апарата;
- \dot{m}_G , kg/s, масени проток паре у произвољном пресеку апарата;

- t_L , °C, температура течности у произвољном пресеку апарата;
- h_G , J/kg, специфична енталпија паре у произвољном пресеку апарата.

Из једначина (2.4) и (2.5) следи

$$\dot{m}_L \cdot [c_L \cdot (t_L - t_{kond}) - \Delta h_{LG}] = \dot{m}_{Lk} \cdot c_L \cdot t_{Lk} + (\dot{m}_{Gp} - \dot{m}_{Lk}) \cdot h_{Gk} - \dot{m}_{Gp} \cdot h_{Gp} \quad (2.6)$$

па на основу једначина (2.3) и (2.6) следи

$$\dot{m}_{Lp} \cdot [c_L \cdot (t_{Lp} - t_{kond}) - \Delta h_{LG}] = \dot{m}_L \cdot [c_L \cdot (t_L - t_{kond}) - \Delta h_{LG}] \quad (2.7)$$

Уколико се уведе променљива

$$\psi = \frac{c_L \cdot (t_{kond} - t_L)}{\Delta h_{LG}} \quad (2.8)$$

која на крајевима (улазу/излазу) апарата има вредности

$$\psi_p = \frac{c_L \cdot (t_{kond} - t_{Lp})}{\Delta h_{LG}} \quad (2.9)$$

односно

$$\psi_k = \frac{c_L \cdot (t_{kond} - t_{Lk})}{\Delta h_{LG}} \quad (2.10)$$

може да се успостави следећа веза

$$\dot{m}_L \cdot (1 + \psi) = \dot{m}_{Lp} \cdot (1 + \psi_p) = \dot{m}_{Lk} \cdot c_L \cdot t_{Lk} + (\dot{m}_{Gp} - \dot{m}_{Lk}) \cdot h_{Gk} - \dot{m}_{Gp} \cdot h_{Gp} \quad (2.11)$$

Уколико се постави билансна једначина за елементарну површину контакта, добија се следећи израз за количину топлоте која се на елементарној површини преда течной фази

$$d\dot{Q} = \alpha_L \cdot (t_{kond} - t_L) \cdot dS_{LG} \quad (2.12)$$

где је α_L (W/(m² · K)) коефицијент прелаза топлоте у течности.

На основу претходних једначина следи следећа једначина за цео апарат

$$\int_{\dot{m}_{Lk}}^{\dot{m}_{Lp}} \frac{\Delta h_{LG} \cdot \dot{m}_L \cdot d\dot{m}_L}{\dot{m}_{Lk} \cdot c_L \cdot t_{Lk} + (\dot{m}_{Gp} - \dot{m}_{Lk}) \cdot h_{Gk} - \dot{m}_{Gp} \cdot h_{Gp} + \Delta h_{LG} \cdot \dot{m}_L} = \int_0^{S_{LG}} \frac{\alpha_L}{c_L} \cdot dS_{LG} \quad (2.13)$$

За инжењерске прорачуне погодно је да се сматра да се коефицијент прелаза топлоте у течности не мења значајно дуж површине за размену топлоте, односно да прорачун може да се обави са осредњеном вредношћу ($\alpha_L = const$). Интеграљењем једначине (2.13) се добија

$$(1 + \psi_p) \cdot \ln \left(\frac{1 + \psi_k \cdot \frac{t_{kond} - t_{Lp}}{t_{kond} - t_{Lk}}}{1 + \psi_p} \right) - \left(\frac{1 + \psi_k}{1 + \psi_p} - 1 \right) = \frac{\alpha_L \cdot S_{LG}}{c_L \cdot \dot{m}_{Lp}} = NTU_L \quad (2.14)$$

где је NTU_L број јединица преноса у течности.

Уколико се промена протока течности у току прорачуна занемари ($d\dot{m}_L = 0$), онда је проток течности кроз апарат константан ($\dot{m}_L = const$) и следи

$$\int_{t_{Lk}}^{t_{Lp}} \frac{dt_L}{t_{kond} - t_L} = \int_0^{S_{LG}} \frac{\alpha_L}{\dot{m}_L \cdot c_L} \cdot dS_{LG} \quad (2.15)$$

одакле, након интеграљења по целој висини апарата добија упрошћени израз

$$\ln \frac{t_{kond} - t_{Lp}}{t_{kond} - t_{Lk}} = \frac{\alpha_L \cdot S_{LG}}{\dot{m}_L \cdot c_L} = NTU_L \quad (2.16)$$

Број јединица преноса у течности (NTU_L) може да се користи као мера интензитета транспорта топлоте и зависи од низа фактора, као што су:

- начин формирања површине контакта;
- облик и величина површине контакта;
- проток фаза;
- термофизичка својства фаза, итд.

У отвореној литератури, поред једначине Чернобилског [2.7], до скоро нису постојеле прорачунске процедуре за прорачун интензитета транспорта топлоте које су неопходне за димензионисање дегазатора. Ипак, на основу експеримента приказаних у [2.8], је установљено да ова процедура није довољно поуздана. Даљим истраживањем предметног феномена, а на основу резултата истраживања интензитета размене топлоте при дегазацији воде помоћу водене паре у колонама са ситастим и преливним подовима приказаним у [2.9] и [2.10], установљено је да број јединица преноса у највећој мери зависи од односа кинетичких енергија фаза који је дефинисан следећим изразом

$$F_{LG} = \frac{\dot{V}_{Lsr}}{\dot{V}_{Gp}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_L}{\rho_G}} \quad (2.17)$$

где су:

- \dot{V}_{Lsr} , m^3/s , средњи запремиски проток воде израчунат као аритметичка средина протока течности на улазу (\dot{V}_{Lp} , m^3/s) и протока на излазу (\dot{V}_{Lk} , m^3/s) из апарата;
- \dot{V}_{Gp} , m^3/s , запремински проток водене паре на улазу у апарат.

На основу теоријског разматрања изнетог у [2.11] закључено је да постоји фундаментална веза између NTU_L и F_{LG} , која се може користити за брзу и тачну процену квалитета експерименталног рада.

2.5 БРОЈ ЈЕДИНИЦА ПРЕНОСА

По дефиницији број јединица преноса у случају да је температура топлијег флуида константна (као што је случај приликом кондензације сувозасићене паре) може да се одреди помоћу следеће једначине

$$NTU_L = \ln \frac{t_{kond} - t_{Lk}}{t_{kond} - t_{Lp}} \quad (2.18)$$

У разматраном случају колоне са слободним формирањем млазева, транспорт топлоте у апарату може да се подели у две основне зоне:

- зону млазева која се простире у горњој зони апарата од дистрибутера течности до пресека у коме долази до дезинтеграције млаза;
- зону капи која се простире у доњој зони апарата од пресека дезинтеграције млазева до нивоа течности на дну колоне.

За сваку од ових зона број јединица преноса може да се изрази преко једначине (2.18).

Приликом одређивања броја јединица преноса за сваку од зона, као и за цео апарат, уведена је оправдана претпоставка да је притисак паре у апарату константан и једнак атмосферском притиску, односно да пад притиска са стране паре може да се занемари.

У том случају је и температура кондензације у апарату константна ($t_{kond} = \text{const}$). Уколико је температура кондензације константна, тада је број јединица преноса у зони млазева

$$NTU_{Lm} = \ln \frac{t_{kond} - t_{Lk}}{t_{kond} - t_{Lmk}} \quad (2.19)$$

а у зони капи

$$NTU_{Lk} = \ln \frac{t_{kond} - t_{Lmk}}{t_{kond} - t_{Lp}} \quad (2.20)$$

где је t_{Lmk} (°C) температура течности на прелазу горње и доње зоне у апарату, односно температура у пресеку дезинтеграције млаза.

Сабирањем једначина (2.19), (2.20) и (2.21) добија се следеће

$$NTU_{Lm} + NTU_{Lk} = \ln \frac{t_{kond} - t_{Lk}}{t_{kond} - t_{Lmk}} + \ln \frac{t_{kond} - t_{Lmk}}{t_{kond} - t_{Lp}} = \ln \frac{t_{kond} - t_{Lk}}{t_{kond} - t_{Lp}} \quad (2.21)$$

односно

$$NTU_L = NTU_{Lm} + NTU_{Lk} \quad (2.22)$$

На основу једначине (2.22) може да се закључи да је број јединица преноса за цео апарат једнак збиру броја јединица преноса за сваку зону појединачно.

2.6 КОЕФИЦИЈЕНТ ПРЕЛАЗА ТОПЛОТЕ

У одсуству некондензујућих гасова, коефицијент пролаза топлоте између паре и течног млаза или капи је практично једнак коефицијенту прелаза топлоте у течности. То омогућава да се коефицијент прелаза топлоте израчуна помоћу израза

$$\alpha_L \cdot S_{LG} = NTU_L \cdot \dot{m}_L \cdot c_L \quad (2.23)$$

у свакој појединачној зони апарата.

На основу једначине (2.23) следи да је за димензионисање контактеног кондензатора неопходно одредити површину контакта фаза и коефицијент прелаза топлоте у течности у појединачним зонама апарата.

Коефицијент прелаза топлоте се изражава преко Нуселтовог (Nu) или Стентоновог броја (St)

$$\alpha_L = \text{Nu} \cdot \frac{\lambda_L}{l_L} = \text{St} \cdot \text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot \frac{\lambda_L}{l_L} \quad (2.24)$$

где су:

- λ_L , W/(m·K), топлотна проводност течности;
- l_L , m, карактеристична геометријска величина млаза или капи.

Како ће бити показано у наредним поглављима генерална форма корелације за сваку од зона апарата се може приказати у облику [2.12], [2.13]

$$Nu = f(Re, Pr, Ku, We, Fr, \text{геометријске величине или односи}) \quad (2.25)$$

где су критеријални бездимензиони бројеви:

- Re , Рејнолдсов број;
- Pr , Прантлов број;
- Ku , Кутателадзеов број;
- We , Веберов број;
- Fr , Фрудов број.

Ознаке

c , $J/(kg \cdot K)$, средњи специфични топлотни капацитет

Fr , Фрудов број

h , J/kg , специфична енталпија

Ku , Кутателадзеов број

l , m , дужина, растојање

\dot{m} , kg/s , масени проток

n , број

NTU , број јединица преноса

p , Pa , притисак

Pr , Прантлов број

Re , Рејнолдсов број

S , m^2 , површина

t , $^{\circ}C$, температура

\dot{V} , m³/s, запремиски проток

We, Веберов број

ρ , kg/m³, густина

α , W/(m²·K), коефициејнт прелаза топлоте

λ , W/(m·K), топлотна проводност

μ , Pa·s, динамичка вискозност

Δh_{LG} , J/kg, топлота кондензације

Индекси

L , течност

G , пара

p , почетак

k , крај, кап

m , млаз

$kond$, кондензација

Литература

- [2.1] Parthasarthy, C., Boiler Operation Engineering, Tata McGraw–Hill, 2000.
- [2.2] Springer–Verlag. VDI Heat Atlas, Berlin Heidelberg (2010)
- [2.3] Jacobs H. R., Direct–Contact Heat Transfer for Process Technologies, ASME Journal of Heat Transfer, vol. 110, no. 11, pp. 1259–1270, 1988.
- [2.4] Green D. W., Perry R. H., Perry's Chemical Engineers Handbook, McGraw–Hill, New York, 2007.
- [2.5] Improving Steam System Performance, A Sourcebook for Industry, U.S. Department for Energy's (DOE) Industrial Technologies Program (ITP)

-
- [2.6] CIBO Energy Efficiency Handbook, Council of Industrial Boiler Owners (CIBO), Burke, 1997.
- [2.7] Чернобилский, И. И., и сар., Машины и аппараты химической производств, Машиностроение, Москва, 1966.
- [2.8] Јаћимовић, Б., Генић, С., Владић, Љ., Истраживање топлотних перформанси контактних кондензатора са сегментним подовима, Процесинг 2007, Београд
- [2.9] Genić, S., Direct–contact condensation heat transfer on downcomerless trays for steam–water system, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol 49, pp. 1225–1230, 2006.
- [2.10] Genić, S., Jaćimović, B., Vladić, Lj., Heat transfer rate of direct–contact condensation of baffle trays, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol 51, pp. 5772–5776, 2008.
- [2.11] Jaćimović N., Genić S., Jaćimović B., Novel method for validation of experimental data for direct contact condensers with zero vapor outflow, Applied Thermal Engineering, vol. 91, pp. 1134–1140, 2015.
- [2.12] Кутателадзе С. С., Теплопередача при конденсации и кипении, Машгиз, Москва, 1952.
- [2.13] Isachenko V. P., Solodov A. P., Samoilovich Y. Z., Kushnyrev V. I., Sotskov S. A., Investigation of heat transfer with steam condensation on turbulent liquid jets, Teploenergetika, vol. 18, no. 2, pp. 7–10, 1971.

3 ПРЕГЛЕД ЛИТЕРАТУРНИХ ИЗВОРА

Након иницијалног периода са почетка 20 века у току кога је размена топлоте при кондензацији паре на млазу течности проучавана само у оквиру препорука до којих се дошло у појединачним експериментима, средином прошлог века долази до широке примене апарата у којима се наведена операција обавља, а тиме и до уопштавања до тада прикупљених сазнања.

Први математички модел који је обухватио феноменологију кондензације паре на млазу течности је поставио Кутателадзе у [3.1] при чему је обухватио и ламинарно и турбулентно струјање цилиндричног и раванског млаза. Потом су доприносе у овој области дали и многи други истраживачи, као нпр. Хасон и сар. [3.2], Мурти и Састри [3.3], Јакобс и Надиг [3.4], Исаченко и сар. [3.5] и [3.6], Скловер и Родвилин [3.7], Бенедек [3.8], Ичиек [3.9], Де Салве и сар. [3.10.], Дебарберис и сар. [3.11], Ким и Милс [3.12], итд.

Број научно–истраживачких и стручних радова који разматра предметну проблематику је веома велики, али нису сви истог значаја, па ће у оквиру овог поглавља биће приказана само најважнија истраживања везана конкретни проблем који је разматран у оквиру дисертације.

3.1 ГРАВИТАЦИОНО ИСТИЦАЊЕ ТЕЧНОСТИ КРОЗ ОТВОРЕ

Истицање течности кроз отворе под дејством гравитације је један од феномена који је описан и проучаван у неким од најстаријих записа од пре неколико хиљада година. Још из времена античких цивилизација постоје бројни уређаји код којих је ова врста

истицања течности нашла практичну примену. Са потребом да се одређене физичке појаве детаљније објасне уз примену математичких модела и кроз веома обимне експерименталне радове појавио се низ истраживача од којих је први био Торичели коме се приписује једначина која повезује проток течности кроз отвор (\dot{V}_L , m³/s) при гравитационом истицању (тз. слободно истицање или истицање при слободном формирању млаза) са висином стуба течности изнад отвора (h_L , m).

3.1.1 Гравитационо истицање течности кроз отворе и формирање млаза

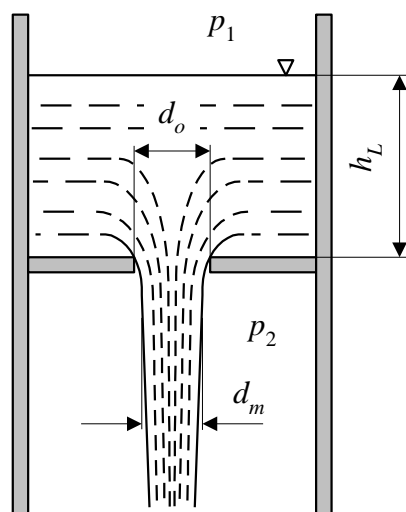
У данашње време је познато да проток течности кроз отвор зависи од h_L , али и од хидродинамичких услова истицања кроз отвор, па се карактеристичне величине повезују постављањем Бернулијеве једначине за пресек изнад и испод отвора. При истицању течности кроз мале отворе кружног облика, млаз течности због дејства инерцијалних сила не прати геометрију отвора тако да долази до његовог сужења, а тиме и до нарушавања једнодимензијског струјања у пресеку отвора за течност. Пошто се Бернулијева једначина може поставити само за пресеке у којима постоји једнодимензијско струјање, уводи се у разматрање коефицијент контракције (ψ) који представља однос површине оног попречног пресека млаза у ком је успостављено једнодимензијско (клипно) струјање и површине отвора за течност (d_o , m)

$$\psi = \left(\frac{d_m}{d_o} \right)^2 \quad (3.1)$$

где је d_m (m) пречник контрахованог млаза.

Бернулијева једначина у складу са сликом 3.1 гласи

$$p_1 + \rho_L \cdot g \cdot h_L = p_2 + (\zeta + 1) \cdot \frac{\rho_L}{2} \cdot \left(\frac{w_L}{\psi} \right)^2 \quad (3.2)$$



Слика 3.1 Истицање течности кроз мали кружни отвор оштрих ивица

где су:

- h_L , m, висина слоја течности на гравитационом дистрибутеру;
- ρ_L , kg/m³, густина течности;
- g , m/s², убрзање силе теже;
- p_1 , Pa, статички притисак у пресеку изнад дистрибутера;
- p_2 , Pa, статички притисак у пресеку испод дистрибутера;
- ζ , коефицијент локалног отпора отвора за течност.

Из израза (3.2) следи брзина течности

$$w_L = \frac{\psi}{\sqrt{\zeta + 1}} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \left(h_L + \frac{p_1 - p_2}{\rho_L \cdot g} \right)} \quad (3.3)$$

Множећи израз (3.3) са површином попречног пресека колоне, и узимајући да су статички притисци изнад и испод дистрибутера течности једнаки добија се

$$\dot{V}_L = n_d \cdot \frac{d^2 \cdot \pi}{4} \cdot k_{ist} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_L} \quad (3.4)$$

где је k_{ist} коефицијент истицања

$$k_{ist} = \frac{\psi}{\sqrt{\zeta + 1}} \quad (3.5)$$

а n_o број отвора на дистрибутеру течности.

За одређивање коефицијента истицања може се препоручити једначина Алтшула [3.23]

према којој је за опсег $Re_{ist} = 0 \div 10^6$

$$k_{ist} = \frac{0,0383 \cdot Re_{ist}^{1,28}}{1,16 + 0,05 \cdot Re_{ist}^{1,3}} \quad (3.6)$$

при чему је Рејнолдсов број дефинисан као

$$Re_{ist} = \frac{\rho_L \cdot d_o}{\mu_L} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_L} \quad (3.7)$$

где је μ_L (Pa·s) динамичка вискозност течности.

Након формирања млаза течности на самом дистрибутеру услед дејства гравитације флуидни делићи у млазу убрзавају па се пречник млаза смањује до тренутка када долази до његовог кидања (дезинтеграције). Капи које настану у овом процесу настављају да се крећу наниже (падају) под дејством гравитације. Идеализовани случај осносиметричног млаза у непокретном окружењу гаса је разматрао Рејли [3.13]. Бор [3.14] је продужио његову анализу, тако што је укључио ефекте вискозности и површинског напона. Онезорг [3.15] је на основу снимака начињених брзом камером (200 до 12 000 слика у секунди) класификовао распад млаза у четири различита режима, уводећи бездимензионе бројеве, квантификујући својства млаза и описујући два гранична услова. Вебер [3.16] и Тејлор [3.17] су објединили претходне анализе, у вези са спољашњим утицајима на распад млаза. Радови поменутих аутора, представљају темељ у анализи фрагментације млаза, који су коришћени у скоро свим каснијим радовима на ову тему. У последње време, у теоријама фрагментације млаза,

присутно је мишљење појединих аутора да геометрија млазница значајно утиче на динамику струјања млаза. Приликом распада млаза, производи фрагментације су примарни лигаменти који могу да наставе да се деле на секундарне капи.

3.1.2 Распад млаза и формирање капи течности

Дисперговање течности у гасу или другој немешљивој течности одвија се у три фазе: формирање млазева или ламела течности, деформисање и кидање ових елемената у капи и фрагментација примарно формираних капи.

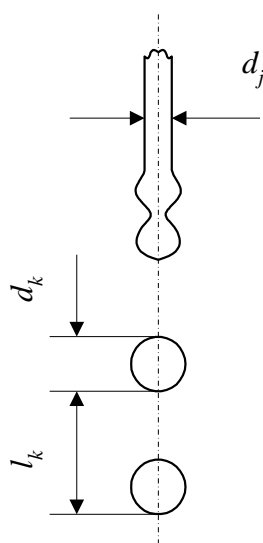
У идеалним условима, када нема спољних утицаја на струјање млаза, може се применити Рејлијев модел према коме је популација монодисперзна, тако да пречник капи има вредност [3.13]

$$d_k = 1,89 \cdot d_m \quad (3.8)$$

а растојање између две суседне капи износи

$$l_k = 4,5 \cdot d_m \quad (3.9)$$

где је d_m (m), средњи пречник млаза течности (слика 3.2).

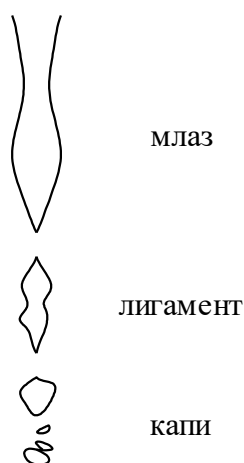


Слика 3.2 Формирање капи течности према [3.13]

Реално понашање млазева течности је на основу снимака техником брзе фотографије шематски приказано на слици 3.3. Уз деформацију млаза утицај сила на граници фаза као и турбуленције унутар самог млаза доводе до формирања тзв. змијоликог облика млаза из кога се откидају лигаменти. Капи се формирају тако што се откидају од лигамената течности, а важно је напоменути да се и првобитно формиране капи могу даље уситњавати. Пречници капи, формираних из млазева течности ниског вискозитета, у дисперзијама течности у гасу, могу се рачунати према једначини (3.8). Млазеви течности великог вискозитета дају при дисперговању у гасу крупније капи, чији се средњи пречници могу предвидети коришћењем Веберове модификације [3.16]

$$d_k = 1,89 \cdot d_m \cdot \left[1 + \frac{3 \cdot \mu_L}{(\sigma \cdot g \cdot \rho_L \cdot d_m)^{1/2}} \right]^{1/6} \quad (3.10)$$

где је σ (J/m^2) површински напон.



Слика 3.3 Формирање лигамената и капи течности

3.1.3 Онезоргова класификација фрагментације млаза

Онезоргова класификација за механизам фрагментације млаза се састоји у подели на следеће режиме:

- Режим 0 – споро капање из млазнице или отвора услед силе гравитације без формирања млаза
- Режим I – дезинтеграција цилиндричног млаза током симетричних површинских осцилација према Рејлију (такозвани варикозни режим); у овом режиму релативна брзина нема утицаја и повећава се брзина млаза узрокована повећањем дужине;
- Режим II – дезинтеграција млаза услед асиметричних таласа (тзв. облик змије) према анализи Вебера (тзв. синусни распад млаза);
- Режим III – атомизација млаза услед унутрашњих турбуленција и увлачења површине млаза.

Бездимензиони бројеви који се користе да опишу динамику млаза су следећи:

- Рејнолдсов број за млаз

$$\text{Re}_m = \frac{\rho_L \cdot w_L \cdot d_o}{\mu_L} \quad (3.11)$$

- Онезоргов број за млаз

$$\text{On}_m = \frac{\text{We}_m^{1/2}}{\text{Re}_m} = \frac{\mu_L}{(\sigma \cdot \rho_L \cdot d_o)^{1/2}} \quad (3.12)$$

- Веберов број за млаз

$$\text{We}_L = \frac{\rho_L \cdot w_L^2 \cdot d_o}{\sigma} \quad (3.13)$$

а остали параметри су:

- w_L , m/s, брзина течности на излазу из млазнице;
- d_o , m, пречник млазнице.

Онезорг је идентификовао следеће услове прелаза између различитих режима фрагментације млаза [3.15]:

- режим 0 није од значаја у индустрији, па неће ни бити коментарисан;
- прелаз из режима (I) у режим (II) може бити одређен помоћу

$$\text{Re}_m = \frac{46}{\text{On}_m^{4/5}} \quad (3.14)$$

- граница прелаза између режима (II) и режима (III)

$$\text{Re}_m = \frac{270}{\text{On}_m^{4/5}} \quad (3.15)$$

Последњи критеријум прелаза је модификован неколико пута помоћу једначине

$$\text{Re}_m = \frac{a}{\text{On}_m^b} \quad (3.16)$$

где су:

- $a = 300$ и $b = 4/5$ према [3.18];
- $a = 370$ и $b = 0,317$ према [3.19];
- $a = 325$ и $b = 0,28$ према [3.20].

Гранични прелази од змијастог млаза у турбулентног млаза су демонстрирани за вредност бездимензионог броја $\text{Re}_m = (2 \div 5) \cdot 10^4$ за воду према [3.15] и [3.20]. Више истраживача је указало на чињеницу да од геометрије млазнице може зависити унутрашња структура млаза, на начин да се могу појачати или ублажити турбуленције на површини млаза. Према истраживањима Ичиека [3.9] и Фаета [3.21] при односу $l_{ml} / d_m < 5$ млаз је увек ламинаран, где је l_{ml} (m) дужина млазнице.

3.2 ПРЕЛАЗ ТОПЛОТЕ ПРИ КОНДЕНЗАЦИЈИ ПАРЕ НА ТЕЧНОМ МЛАЗУ

У чланку [3.22] аутори су сублимирали претходна истраживања прелаза топлоте при кондензацији паре на течном млазу и капима користећи се критеријумом из [3.20] према коме до распада млаза долази при

$$\frac{L_m}{d_o} = 4,8 \cdot We_L^{0,32} \quad (3.17)$$

где је L_m (m) дужина млаза.

У зависности од граничног услова (3.17) у [3.22] се разликују 4 могуће радне области.

Када је испуњен услов

$$w_L \cdot \left(\frac{\mu_G}{\sigma} \right) \cdot \left(\frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^{0,5} \geq 3,7 \cdot 10^{-5} \quad (3.18)$$

ефекти површинских поремећаја млаза се морају узети у обзир па се разликују:

- област А када се млаз прекида при $L_m / d_o \geq 4,8 \cdot We_L^{0,32}$;
- област В када млаз није прекинут при $L_m / d_o < 4,8 \cdot We_L^{0,32}$.

При

$$w_L \cdot \left(\frac{\mu_G}{\sigma} \right) \cdot \left(\frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^{0,5} < 3,7 \cdot 10^{-5} \quad (3.19)$$

ефекти површинских поремећаја млаза се могу занемарити и разликују се:

- област С када млаз није прекинут при $L_m / d_o < 4,8 \cdot We_L^{0,32}$;
- област D када је млаз прекинут при $L_m / d_o \geq 4,8 \cdot We_L^{0,32}$.

На основу сопствених експеримената предложена корелација има општи облик [3.22]

$$St = c_1 \cdot d_o^{c_2} \cdot \left(\frac{L_m}{d_o}\right)^{c_3} \cdot w_L^{c_4} \cdot \nu_L^{c_5} \cdot \left(\frac{\rho_G}{\sigma}\right)^{c_6} \quad (3.20)$$

а параметри су дати у табели 3.1.

Табела 3.1 Параметри у (3.20)

Област	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6
A	$3,2 \cdot 10^{-4}$	2,16	0,16	1,48	-0,61	0,32
B	$3,2 \cdot 10^{-5}$	1,09	-0,31	0,55	-0,61	0,32
C	$1,3 \cdot 10^{-5}$	0,38	-0,72	-0,20	-0,61	0,32
D	$7,3 \cdot 10^{-6}$	1,06	0,40	-0,30	-0,61	0,32

Имајући у виду области A ÷ D дефинисане у [3.22] остала битнија истраживања и добијене корелације су следеће.

Исаченко и сар. су у [3.5] су за области A ÷ D дали корелацију

$$St = \begin{cases} 0,0129 \cdot \left(\frac{d_o}{L_m}\right)^{0,54} \cdot \exp(0,135 \cdot We_G) & L_m / d_o \leq 95 \\ 0,00375 \cdot \left(\frac{d_o}{L_m}\right)^{0,27} \cdot \exp(0,135 \cdot We_G) & L_m / d_o > 95 \end{cases} \quad (3.21)$$

док су у [3.6] дали нешто компликованији израз

$$St = \begin{cases} 0,0335 \cdot \left(\frac{d_o}{L_m}\right)^{0,42} \cdot Re^{-0,17} \cdot Pr_L^{-0,09} \cdot Ku^{0,13} \cdot We_G^{0,35} & We_G > 2,7 \\ 0,0333 \cdot \left(\frac{d_o}{L_m}\right)^{0,41} \cdot Re^{-0,18} \cdot Pr_L^{-0,05} \cdot Ku^{0,11} \cdot \exp(0,16 \cdot We_G^{0,35}) & We_G \leq 2,7 \end{cases} \quad (3.22)$$

где су:

- Кутателадзеов број

$$\text{Ku} = \frac{\Delta h_{LG}}{c_L \cdot (t_{kond} - t_L)} \quad (3.23)$$

- Прантлов број за течност

$$\text{Pr}_L = \frac{c_L \cdot \mu_L}{\lambda_L} \quad (3.24)$$

- Веберов број за пару

$$\text{We}_G = \frac{\rho_G \cdot w_L^2 \cdot d_o}{\sigma} \quad (3.25)$$

а остали параметри су:

- ρ_G , kg/m³, густина паре;
- Δh_{LG} , J/kg, специфична топлота кондензације;
- c_L , J/(kg·K), специфични топлотни капацитет течности;
- λ_L , W/(m·K), топлотна проводност течности;
- t_{kond} , °C, температура кондензације;
- t_L , °C, температура течности.

Такође за све области струјања Бенедек је дао корелацију [3.8]

$$\text{St} = 0,00263 \cdot \left(\frac{d_o}{L_m} \right)^{0,06} \cdot \text{Ku}^{0,084} \quad (3.26)$$

У области В према корелацији Скловера и Родивилина [3.7] је

$$\text{St} = 2,7 \cdot \left(\frac{d_o}{L_m} \right)^{0,6} \cdot \text{Re}^{-0,4} \cdot \text{Pr}_L^{-0,55} \cdot \text{Ku}^{0,11} \cdot \text{We}_G^{0,4} \quad (3.27)$$

Према [3.12] у области С се може применити

$$\text{St} = 3,2 \cdot \left(\frac{d_o}{L_m} \right)^{0,57} \cdot \text{Re}^{-0,58} \cdot \text{We}_L^{0,19} \cdot \text{Pr}^{-0,7} \quad (3.28)$$

Дебарберис и сар. су у [3.11] дали корелацију за област D у облику

$$St = 3,25 \cdot \left(\frac{d_o}{L_m} \right)^{0,52} \cdot Re^{-0,38} \cdot Pr_L^{-0,52} \cdot Ku^{-0,19} \quad (3.29)$$

За области C и D се према Ичиеку [3.9] може применити корелација

$$St = \begin{cases} 0,00375 \cdot \left(\frac{d_o}{L_m} \right)^{0,28} \cdot Fr^{-0,1} & L \leq 11,5 \cdot We_L^{0,31} \\ 0,0038 \cdot \left(\frac{d_o}{L_m} \right)^{0,22} \cdot Fr^{-0,18} & L \geq 11,5 \cdot We_L^{0,31} \end{cases} \quad (3.30)$$

где је Фрудов број

$$Fr = \frac{w_L^2}{g \cdot d_o} \quad (3.31)$$

У табели 3.2 приказан је опсег радних и конструкционих параметара за наведене корелације.

Табела 3.2 Опсег радних и конструкционих параметара за корелације из литературе

Једначина	(3.20)	(3.21)	(3.22)	(3.26)
d_o , mm	3,5	2,18	2,2 ÷ 6,07	6,13
H_{LG} , mm	60 ÷ 316	20 ÷ 400	-	-
t , °C	30 ÷ 70	18,8 ÷ 89,0	18,8 ÷ 89,0	-
p , bar	0,3 ÷ 4,4	1,6 ÷ 1,7	1,5 ÷ 1,6	-
Re	13500 ÷ 271000	11800 ÷ 66400	15000 ÷ 100000	30000 ÷ 180000
Pr_L	1,0 ÷ 5,2	1,8 ÷ 6,4	1,8 ÷ 6,4	3 ÷ 7
We_G	0,2 ÷ 17,0	1,1 ÷ 4,1	0,4 ÷ 5,5	-
Ku	5,8 ÷ 77,9	5,8 ÷ 23,8	6 ÷ 50	-
Fr	-	-	-	-

Једначина	(3.27)	(3.28)	(3.29)	(3.30)
d_o , mm	15 ÷ 30	3 ÷ 7	2	2 ÷ 7
H_{LG} , mm	780 ÷ 860	20 ÷ 120	150 ÷ 450	40 ÷ 900
t , °C	-	4 ÷ 27	18 ÷ 90	23,9 ÷ 65,0
p , bar	-	-	1,5 ÷ 3,68	1
Re	140000 ÷ 900000	6000 ÷ 40000	6000 ÷ 40000	-
Pr_L	2,5 ÷ 4	-	2 ÷ 7,5	-
We_G	160 ÷ 3000	-	0,15 ÷ 3,5	-
Ku	9 ÷ 60	-	4 ÷ 15	-
Fr	-	-	3 ÷ 18	10,5 ÷ 104

Ознаке

c , J/(kg·K), специфични топлотни капацитет

d , m, пречник

Fr, Фрудов број

g , m/s², убрзање силе теже

h , m, висина

ist , истицање

k , коефицијент

Ku, Кутателадзеов број

L, l , m, дужина

n , број

Op, Онезоргов број за млаз

p , Pa, статички притисак

Pr , Прантлов број

Re , Рејнолдсов број

St , Стентонов број

t , °C, температура

\dot{V} , m³/s, проток

w , m/s, брзина

We , Веберов број

Δh_{LG} , J/kg, топлота кондензације

ψ , коефицијент контракције

ζ , коефицијент локалног отпора отвора за течност

λ , W/(m·K), топлотна проводност

μ , Pa·s, динамичка вискозност

ν , m²/s, кинематска вискозност

ρ , kg/m³, густина

σ , J/m², површински напон

Индекси

G , пара

ist , истицање

k , кап

$kond$, кондензација

L , течност

m , млаз

ml, млазница

o, отвор

Литература

- [3.1] Кутателадзе С. С., Теплопередача при конденсации и кипении, Машгиз, Москва, 1952.
- [3.2] Hasson D., Luss D., Peck R., Theoretical analyses of vapour condensation on laminar liquid jets, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 7, no. 9, pp. 969–981, 1964.
- [3.3] Murty N. S., Sastri V. M. K., Direct contact heating of laminar falling liquid jets, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 19, no. 1, pp. 115–117, 1976.
- [3.4] Jacobs H. R., Nadig R., Condensation on Coolant Jets and Sheets Including the Effects of Noncondensable Gases, *ASME J. Heat Transfer*, vol. 109, no. 4, pp. 1013–1020, 1987.
- [3.5] Isachenko V. P., Solodov A. P., Samoilovich Y. Z., Kushnyrev V. I., Sotskov S. A., Investigation of heat transfer with steam condensation on turbulent liquid jets, *Teploenergetika*, vol. 18, no. 2, pp. 7–10, 1971.
- [3.6] Isachenko V. P., Solodov A. P., Heat transfer with steam condensation on continuous and on dispersed jets of liquid, *Teploenergetika*, vol. 19, no. 9, pp. 24–27, 1972.
- [3.7] Sklover G., Rodivilin M., *Teploenergetika*, vol. 23, no. 4, pp. 30, 1976.]
- [3.8] Benedek S., Heat transfer at the condensation of steam on turbulent water jet, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 19, pp. 448–450, 1976.

-
- [3.9] Iciek J. The hydrodynamics of a free, liquid jet and their influence on direct contact heat transfer; *International Journal of Multiphase Flow*; Part 1 vol. 8, no.3, pp. 239–249; Part 2, vol. 8, no. 3, pp. 251–260, Part 3 vol. 9, no. 2, pp. 167–179
- [3.10] De Salve M., Panella B., Scorta G., Heat and mass transfer by direct condensation of steam on a subcooled turbulent water jet, *Proc. 8th Int. Heat Transfer Conf, San Francisco*, vol. 4, pp. 1653–1658, 1986.
- [3.11] Debarberis L., De Salve M., Panella B., Scorta G., Direct condensation of saturated steam on a liquid jet, *International journal of heat and technology*, vol. 5, pp. 36–54, 1987.
- [3.12] Kim S., Mills, A., Condensation on Coherent Turbulent Liquid Jets, *ASME Journal of Heat Transfer*, vol. 111, no. 4, pp. 1068–1074, 1989.
- [3.13] Rayleigh L., On the instability of jets, *Proc. London Math. Soc.* 10, no. 7, 1878.
- [3.14] Bohr N., Determination of the surface–tension of water by method of jet vibration, *Phill. Trans. Roy. Soc. London, Series A.* 209, pp. 281, 1909.
- [3.15] Ohnesorge W., Die Bildung von Tröpfchen an Düsen und die Auflüssiger Strahlen, *Z. Angew. Math. Mech.*, vol. 16, pp. 335–359, 1936.
- [3.16] Weber C., Zum Zerfall eines Flüssigkeitsstrahles, *Z. Angew. Math. Mech.*, vol. 11, pp. 136–154, 1936.
- [3.17] Batchelor G. K. (ed), *Collected works of Taylor G. I.*, Cambridge Univ. Press, Cambridge MA, 1958.
- [3.18] Merrington A. C., Richardson E. G., The breakup of liquids jets, *Proc. Phys. Soc.*, vol. 59, pp. 1–13, 1947.
- [3.19] Tanzawa Y., Toyoda S., *Trans. J.S.M.E.* vol. 20, pp 306, 1954.

-
- [3.20] Grant R. P., Middleman S., Newton Jet Stability, *AIChEJ*, vol. 12, no. 4, pp. 669, 1966.
- [3.21] Faeth G. M., Spray combustion: a review, *Proc. of The 2nd International Conference on Multiphase Flow*, Kyoto, Japan, 1995.
- [3.22] Takahashi M., Fujinuma H., Tsukui J., Inoue A., Experimental Study on Condensation Heat Transfer on Surface of Liquid Jet, *Journal of Nuclear Science and Technology*, vol. 29, no. 8, pp. 721–734, 1992.
- [3.23] Альтшуль А. Д., Истечение из отверстия жидкостей с повышенной вязкостью, *Нефтяное хозяйство*, бр. 2, 1950.

4 ОПИС ЕКСПЕРИМЕНТАЛНЕ ИНСТАЛАЦИЈЕ И ПОСТУПКА МЕРЕЊА

Експериментална инсталација смештена је у топлани Коњарник (као део система даљинског грејања града Београда). Инсталација је коришћена и за претходна истраживања која се наводе у литературним изворима [4.1], [4.2] и [4.3].

4.1 ОПИС ЕКСПЕРИМЕНТАЛНЕ ИНСТАЛАЦИЈЕ

Експериментална инсталација приказана је на сликама 4.1 и 4.2, а њена фотографија дегазатора је дата на слици 4.3.

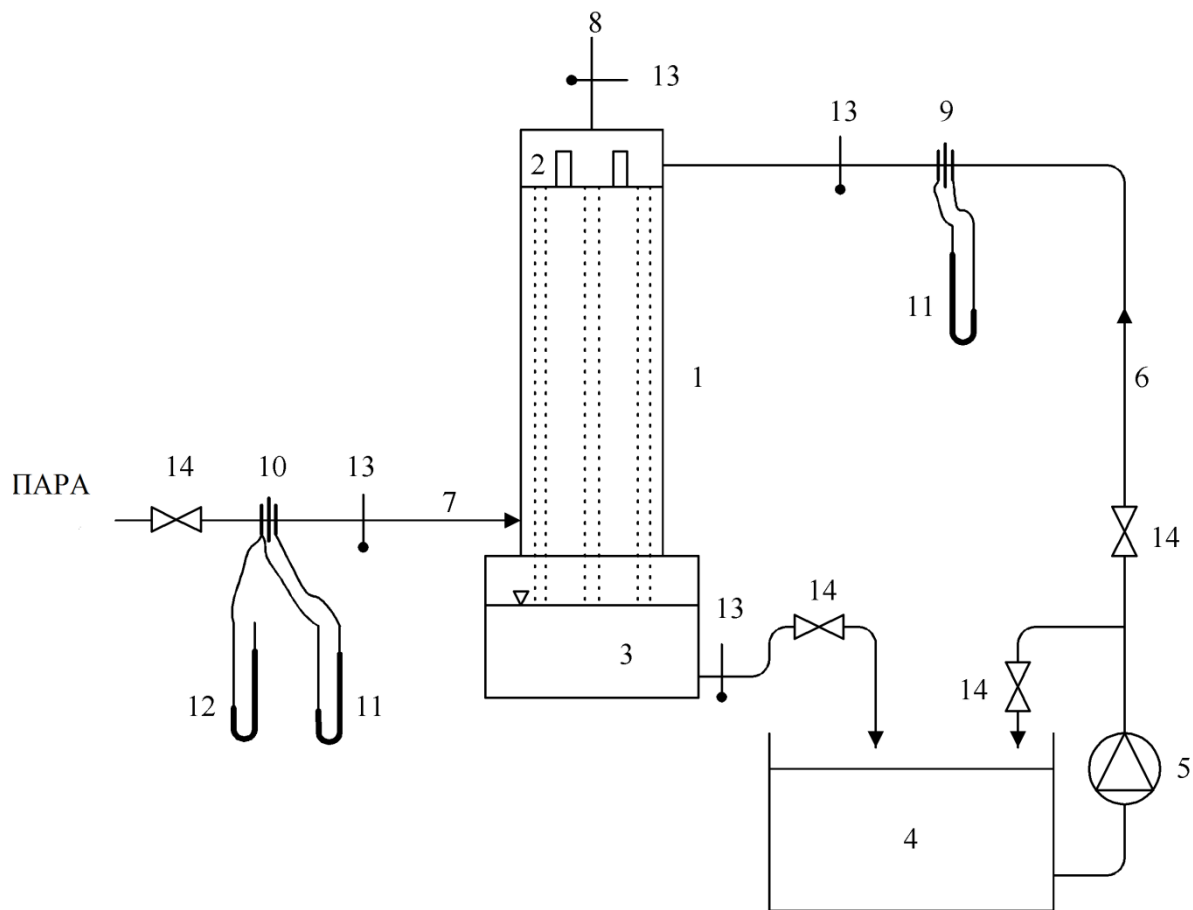
Мерења за потребе дисертације су вршена на експерименталној инсталацији чији су основни елементи:

- полуиндустрјски дегазатор (1) са сабирним резервоаром (3);
- сабирни базен (запремине 60 m^3) за деминерализовану воду (4);
- циркулациона пумпа (5);
- цевовод за воду са пратећом арматуром (6) и обилазним водом;
- цевовод за водену пару са пратећом арматуром (7);
- регулациони вентили (14);
- мерна опрема: манометри, U-цеви са живом (11 и 12), мерне бленде (9 и 10) и термометри (13).

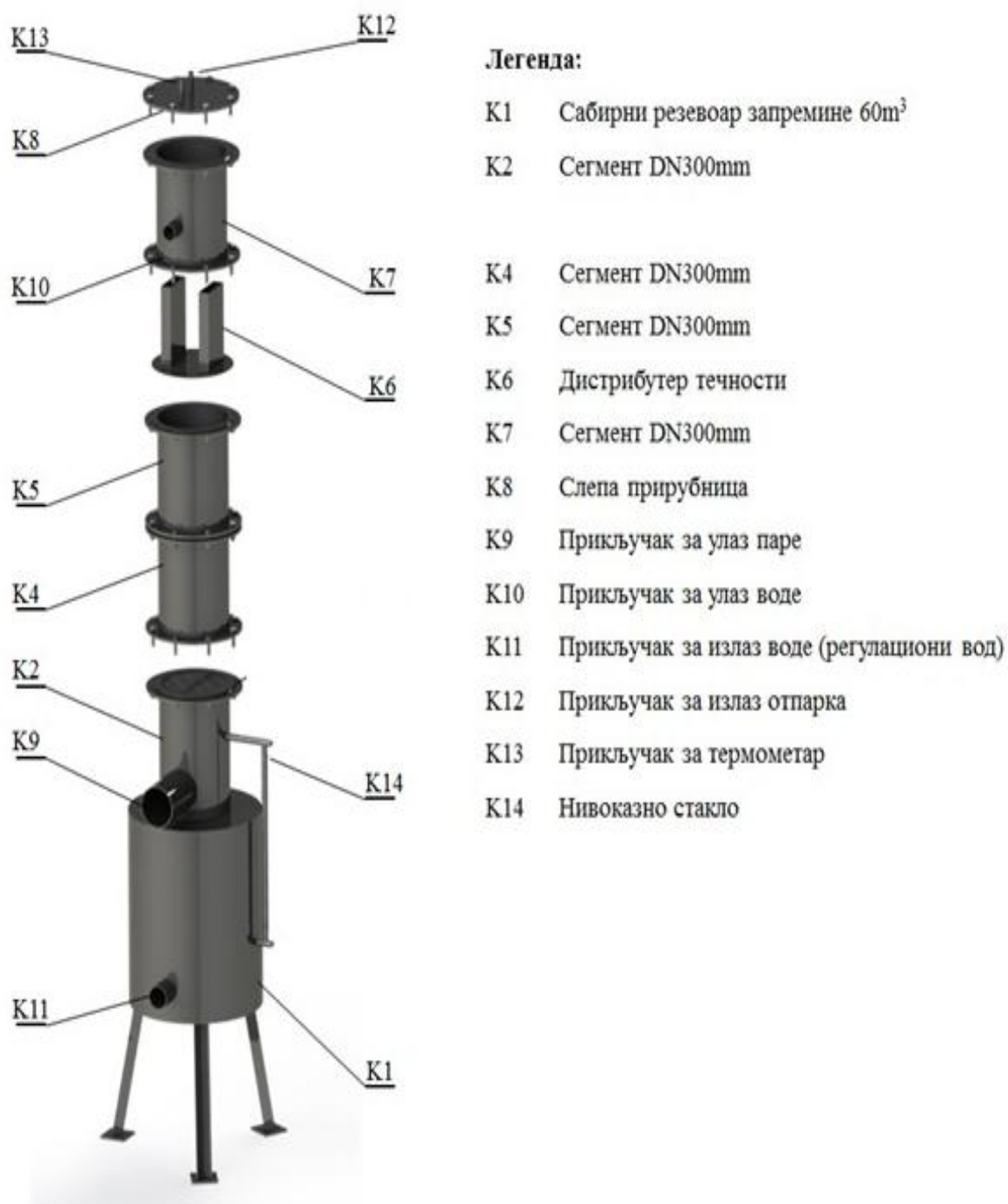
Вода се уводи у горњи део дегазатора (1) из базена за воду (4) помоћу циркулационе пумпе (5). На цевоводу за воду (6), пречника DN 50 ($\text{Ø } 57 \times 51.2 \text{ mm}$), су уграђени вентили (14), као и обилазни вод за потребе регулације протока воде. За мерење

протока воде користи се мерна бленда (9) повезана са диференцијалним манометаром са живом (11), док се температура воде мери помоћу термометра типа РТ–100 са тачношћу мерења од $0,1^{\circ}\text{C}$ (13).

Водена пара се у систем уводи са разделника паре преко цевовода за пару (7), пречника DN 150 ($\text{Ø}159 \times 4,5 \text{ mm}$), у доњи део дегазатора (1). Проток паре се регулише запорним вентилом (14), а мери помоћу мерне бленде (10) повезане на диференцијални манометар са живом (11). Апсолутни притисак паре се мери помоћу манометра са живом (12), а температура помоћу термометра типа РТ–100 (13).



Слика 4.1 Шематски приказ инсталације



Слика 4.2 Шематски приказ дегазационе колоне



Слика 4.3 Фотографија дегазационе колоне

Ниво воде у сабирном резервоару (3) се одржава на задатој висини помоћу повратног вода, пречника DN 80 (Ø88,9 x 3,2 mm), на коме се налази запорни вентил (14) и термометар типа РТ-100 (13).

Дегазациона колона (1) је номиналног пречника DN 300 (Ø 323,9 / 309,7 mm) и на врху колоне је постављен дистрибутер за воду (2). Дно колоне (3) је пречника Ø 600 mm и висине 1000 mm. На врху колоне се налази одушна цев за излаз отпарка DN 20.

Мерења су вршена за три различите висине постављања дистрибутера течности. Како је у сабирном резервоару (3) одржаван константан ниво воде, висина контакта паре и течности је износила 680 mm, 1080 mm и 1480 mm.

Протоци воде и водене паре су одређивани применом мерних бленди у складу са стандардом ISO 5167-2:2003, односно мерењем разлике притисака испред и иза мерне бленде. Мерење разлике притиска спроведено је помоћу диференцијаних манометара са живом који имају опсег мерења 0÷400 mmHg.

За мерење протока паре коришћена је мерна бленда са отвором пречника Ø 47 mm, постављена на цевовод номиналног пречника DN150. За одређивање протока паре неопходно је мерење следећих параметара:

- разлика притисака испред и иза мерне бленде Δp_{bG} , mmHg ;
- температура паре на улазу у колону t_G , °C ;
- надпритисак испред бленде p_{mG} , mmHg ;
- барометарски притисак p_{bar} , kPa .

На линији воде коришћена је мерна бленда са отвором пречника Ø24mm постављене на цевовод DN50. За одређивање протока воде потребно је да се прате следећа два параметра:

- разлика притисака испред и иза бленде Δp_{bL} , mmHg;
- температура воде на улазу у колону t_{Lp} , °C.

Битно је да се напомене да за протоке воде веће од од 9,75 m³/h (што одговара густинама квашења већим од 130 m³/(m²·h) није било могуће мерење протока помоћу постојеће мерне бленде с обзиром на величину разлике притисака испред и иза мерне бленде. У тим случајевима протоци су мерени помоћу ултразвучног мерила протока типа „Portaflow Mk II“.

Мерење температуре, као што је већ напоменуто, је вршено отпорним термометрима са платином типа РТ–100 који имају тачност мерења 0,1°C. Температурске сонде су постављене у одговарајуће чауре унутрашњег пречника Ø21,9 mm, које су напуњене термалним уљем и повезане помоћу трожилних силиконских каблова са уређајем за вишеканално читавање температура типа ”Меконтик”.

Аквизиција очитаних вредности температура је вршена преко комуникационог порта RS424, вредности су послате у рачунар где је извршена и обрада мерених вредности у одговарајућем софтверу.

4.2 ПОСТУПАК МЕРЕЊА

Мерења су класификована у три групе у зависности од висине постављања дистрибутера течности. За сваку групу мерења је вршено више серија мерења. Свака серија мерења подразумева варијацију протока паре од минималне до максимално могуће вредности при константној густини квашења (константном протоку течности).

Мерења при константној густини квашења су започињана са минималним протоком паре који се постепено повећавао до максимално могућег протока паре који колону доводи до нестабилног рада. Након завршетка сваке серије мерења, који је

константован достизањем максималног протока паре, проток воде је повећаван на следећу задату вредност.

На почетку сваке серије мерења први корак је да се у дегазационој колони (1) подеси жељени проток воде, односно густина квашења, као и да се постигну стационарни услови. Када је постигнута жељена густина квашења, подешава се проток воде на излазу из сабирног резервоара (3) помоћу запорног вентила тако да се у резервоару успостави стални ниво на 280 mm од горње коте резервоара. Следећи корак је увођење сувозасићене водене паре у систем и подешавање њеног протока на улазу у дегазациону колону (1).

Након подешавања жељених параметара, колона се оставља у том радном режиму све до постизања стационарног стања. Стационарно стање је константовано стабилизацијом радних параметара, односно стабилизацијом температура у цевоводима за улаз воде и улаз паре, као и у повратном воду и на врху колоне, где је мерена температура отпарка. Као што је већ наведено, температуре су праћене помоћу отпорних термометара типа РТ–100. Све температурске мерне сонде су повезане на уређај за вишеканално мерење температуре типа „Меконтик“, који је повезан са рачунаром помоћу кога су обрађивани резултати мерења. Постизање стационарног стања је проверавано билансним једначинама према поступку описаном у Поглављу 5.

За сваки радни режим мерене су следеће величине:

- проток воде на улазу у колону \dot{m}_{Lp} , kg/s ;
- проток паре на улазу у колону \dot{m}_{Gp} kg/s ;
- температура воде на улазу у колону t_{Lp} , °C ;
- температура воде на излазу из колоне t_{Lk} , °C ;

- температура паре на улазу у колону $t_G, ^\circ\text{C}$;
- температура паре на одушној цеви $t_{op}, ^\circ\text{C}$.

Поступак мерења се на овај начин вршио све до постизања максималног могућег протока паре који може да се прочита на диференцијалном манометру или оног протока паре који доводи до нестабилног рада колоне, који је константован појавом континуалног млаза паре на одушку на врху колоне као што је приказано на слици 4.4. (стабилан рад колоне се огледао у прекидном, релативно ретком и кратком млазу паре на одушној цеви). За све ово време проток воде фиксиран је на задату густину квашења, који је као и ниво течности у резервоару констатно контролисан.



Слика 4.4 Дегазациона колоне при нестабилном раду

Свака серија мерења се завршава достизањем максималног протока паре за изабрану густину квашења. Нова серија мерења започиње са подешавањем следеће вредности и мерење се понавља по унапред описаном поступку. На овај начин су се вршиле серије мерења од минималне до максималне густине квашења.

4.3 СТАЦИОНАРНОСТ РАДНОГ РЕЖИМА

Главни и неопходан услов за анализу интензитета размене топлоте је стационарност радног режима, која се огледа у чињеници да се процес одвија при константним, односно временски непроменљивим вредностима протока и температура флуида. На експерименталној инсталацији стационарност радног режима је праћена мерењем одговарајућих радних параметара, односно протока и температура.

При стационарним радним условима морају да буду испуњене једначине материјалног (4.1) и енергетског биланса дегазатора (4.2).

$$\dot{m}_{Lp} + \dot{m}_G = \dot{m}_{Lk} \quad (4.1)$$

$$\dot{m}_{Lp} \cdot c_L \cdot t_{Lp} + \dot{m}_G \cdot h_G = \dot{m}_{Lk} \cdot c_L \cdot t_{Lk} \quad (4.2)$$

где су:

- c_L , J/(kg · K), специфични топлотни капацитет воде;
- h_G , J/kg, специфична енталпија водене паре на улазу у апарат.

Приликом одређивања биланса уведене су следеће претпоставке:

- у једначини (4.1) се масени проток паре на излазу из колоне занемарује, односно претпоставља се да се целокупна количина паре кондензовала у апарату;
- претпоставља се да прорачун може да се изврши са довољном тачношћу коришћењем осредњених вредности термофизичких својстава радних флуида у дијапазону промене радних температура;

- размена топлоте између апарата и околине је занемарена.

Стационарност процеса је утврђивана на основу протока воде на излазу из апарата, који може да се одреди помоћу једначина масеног (4.3) или енергетског биланса (4.4).

$$\dot{m}_{Lk}^{(4.1)} = \dot{m}_{Lp} + \dot{m}_G \quad (4.3)$$

$$\dot{m}_{Lk}^{(4.2)} = \frac{\dot{m}_{Lp} \cdot c_L \cdot t_{Lp} + \dot{m}_G \cdot h_G}{c_L \cdot t_{Lk}} \quad (4.4)$$

На основу тако израчунатих протока воде на излазу из апарата, средња вредност протока воде износи

$$\dot{m}_{Lk} = \frac{\dot{m}_{Lk}^{(4.1)} + \dot{m}_{Lk}^{(4.2)}}{2} \quad (4.5)$$

Грешка у билансу се дефинише као

$$\Delta B = \frac{\sqrt{\left(\dot{m}_{Lk}^{(4.1)} - \dot{m}_{Lk}\right)^2 + \left(\dot{m}_{Lk}^{(4.2)} - \dot{m}_{Lk}\right)^2}}{\dot{m}_{Lk}} \quad (4.6)$$

Грешка у билансу дефинисана једначином (4.6) је током експеримента углавном износила испод 10%, што се у инжењерској пракси сматра стационарним радним режимом [4.1], [4.2], [4.3].

За све три висине постављања дистрибутера течности вршена су мерења при протоцима воде у опсегу од 2,4 m³/h до 15,1 m³/h. Температура воде на улазу у колону је варијала од 9,4°C до 12,7°C, а на излазу из сабирног резервоара је била 29,8÷98,0°C. Проток паре је износио 202 kg/h до 840 kg/h, а притисак паре на улазу је био практично атмосферски (100,1 kPa до 101,8 kPa) са максималном температуром паре од 106,9°C.

Укупни број радних режима при којима је успостављено стационарно стање, са прихватљивом дисперзијом $\Delta B < 10\%$, износио је 367. Резултати мерења радних параметара су дати у Прилогу 1.

Ознаке

c , J/(kg·K), специфични топлотни капацитет

h , J/kg, топлота кондензације

m , kg/s, масени проток

p , Pa, статички притисак

t , °C, температура

Δp , Pa, разлика притисака

ΔB , грешка у билансу

Индекси

b , бленда

bar , барометарски

G , пара

k , крајње

L , течност

m , манометарски

otr , отпарак

p , почетно

Литература

- [4.1] Genić, S., Direct–contact condensation heat transfer on downcomerless trays for steam–water system, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol 49, pp. 1225–1230, 2006.

- [4.2] Genić, S., Jaćimović, B., Vladić, Lj., Heat transfer rate of direct–contact condensation of baffle trays, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol 51, pp. 5772–5776, 2008.
- [4.3] Jaćimović N., Genić S., Jaćimović B., Novel method for validation of experimental data for direct contact condensers with zero vapor outflow, *Applied Thermal Engineering*, vol. 91, pp. 1134–1140, 2015.

5 АНАЛИЗА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИХ РЕЗУЛТАТА

Будући да је циљ рада на дисертацији био да се испита интензитет кондензације приликом преноса топлоте на слободно формираном течном млазу у директном контакту са паром на атмосферском притиску, користили смо два извора података:

- податке добијене на основу аквизиције експерименталних података (из експеримента изведеног у оквиру практичног дела докторске дисертације)
- податке из отворених литературних извора.

Анализа експерименталних података обављена је у два корака:

- поређење са корелацијама из отворене литературе;
- постављање нове корелације.

5.1 СТАТИСТИЧКИ ПАРАМЕТРИ

За сваки од n експерименталних радних режима може се извршити поређење мерене вредности z_i са корелисаном вредности истог параметра z_i^c . Средња вредност параметара за комплетан сет експерименталних података је

$$z_{av} = \frac{\sum_{i=1}^n z_i}{n} \quad (5.1)$$

За одређивање квалитета корелација коришћени су следећи статистички параметри:

- Θ , корелациони однос

$$\Theta = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^n (z_i - z_i^c)^2}{\sum_{i=1}^n (z_i - z_{av})^2}} \quad (5.2)$$

- Δ_{av} , стандардно (средње квадратно) одступање

$$\Delta_{av} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{z_i - z_i^c}{z_i} \right)^2}{n}} \quad (5.3)$$

- максимално позитивно одступање

$$\max RE^+ = \max \left(\frac{z_i - z_i^c}{z_i} \right) \quad (5.4)$$

- максимално негативно одступање

$$\max RE^- = \max \left(\frac{z_i^c - z_i}{z_i} \right) \quad (5.5)$$

5.2 СОПСТВЕНА МЕРЕЊА

Као што је речено у поглављу 4 резултати мерења радних параметара на полуиндустријској експерименталној инсталацији су дати у Прилогу 1.

Мерења су вршена на колони пречника DN 300 (унутрашњи пречник колоне $D_k = 309$ mm) са три висине дистрибутера течности: висина контакта паре и течности је износила $H_{LG} = 680$ mm, $H_{LG} = 1080$ mm и $H_{LG} = 1480$ mm. Остали радни услови су били:

- проток воде $\dot{V}_{Lp} = 2,4 \div 15,1$ m³/h;
- температура воде на улазу у колону $t_{Lp} = 9,4 \div 12,7$ °C;
- температура воде на излазу колоне $t_{Lk} = 29,8 \div 98,0$ °C
- проток водене паре $\dot{m}_G = 202 \div 840$ kg/h;

- апсолутни притисак у колони $p_G = 100,1 \div 101,8$ kPa
- температура паре $t_G = 100 \div 106,9$ °C.

Пречник отвора на дистрибутеру течности је био $d_o = 7$ mm, а укупан број отвора за дистрибуцију течности је $n_o = 95$.

Укупни број прихватљивих радних режима, на основу критеријума стационарности приказаног у поглављу 4, је био $n = 367$.

5.3 ПОДАЦИ ИЗ ОТВОРЕНЕ ЛИТЕРАТУРЕ

Са циљем генерализације истраживања, коришћени су подаци из отворене литературе [5.1] и [5.2]. У оба извора је обављен експериментални рад при загревању сока шећерне трске (садржаја шећера је $15 \div 20$ Brix) при директном контакту са воденом паром. Експерименти су извођени на "Fairymead" испаривачкој станици у Queensland (Аустралија). Резултати мерења радних параметара на индустријској експерименталној инсталацији су дати у Прилозима 2, 3 и 4. Укупан број обављених мерења је $n = 97$ и основни подаци у вези са самог апарата за примарно загревање сока су приказани у табели 5.1.

Табела 5.1 Основни подаци у вези са примарним загревањем сока

D_k , mm	n_o	d_o , mm	H_{LG} , mm	n	Литература
910	290	12,5	1825	25	[5.1]
910	200	12,5	1825	35	[5.1]
1828	1008	12	2708	37	[5.2]

Опсег промене радних параметара при мерењима је био следећи:

- проток паре на улазу у колону $\dot{m}_G = 0,85$ t/h до 28,9 t/h;

- проток течности на улазу у колону $\dot{m}_{Lp} = 120 \div 1700 \text{ t/h}$;
- температура течности на улазу $t_{Lp} = 34,5 \div 43^\circ\text{C}$
- температура на дну колоне (температура течности на излазу) $t_{Lk} = 56 \div 83,5^\circ\text{C}$;
- апсолутни притисак у колони $p_G = 14,8 \div 62,8 \text{ kPa}$

5.4 СВОЈСТВА ФЛУИДА

Својства воде и водене паре су израчунавана помоћу једначина из [5.3]. У складу са [5.4] својства шећерног сирупа су следећа:

- густина у kg/m^3

$$\rho_L = 1063 - 0,5 \cdot (t - 20) \quad (5.6)$$

- специфични топлотни капацитет у $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

$$c_L = 3562 + 1,75 \cdot (t - 20) \quad (5.7)$$

- топлотна проводност у $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

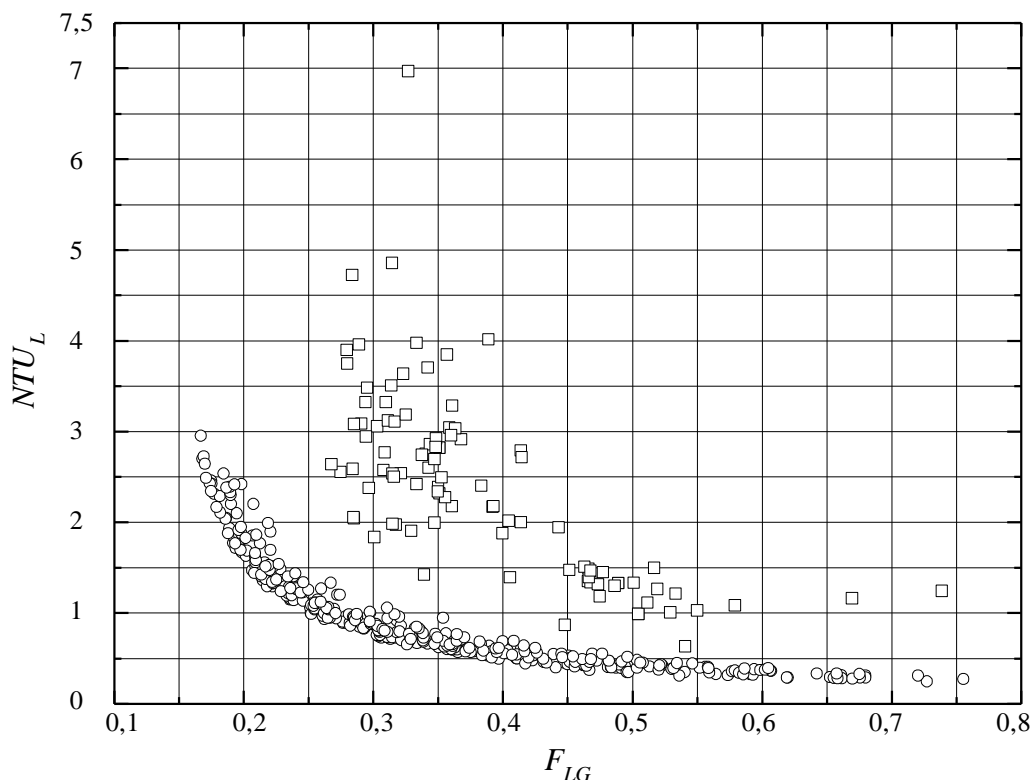
$$\lambda_L = 0,488 + 0,00068 \cdot (t - 20) \quad (5.8)$$

Динамичка вискозност шећерног сирупа, изражена у $\text{Pa} \cdot \text{s}$, је израчунавана помоћу једначине [5.16]

$$\mu_L = \frac{0,186}{(t + 24,3)^{1,26}} \quad (5.9)$$

5.5 ПОРЕЂЕЊЕ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИХ ПОДАТАКА И КОРЕЛАЦИЈА ИЗ ОТВОРЕНЕ ЛИТЕРАТУРЕ

У поглављу 2 је објашњено да постоји теоријски доказива веза између броја јединица преноса и односа кинетичких енергија. На слици 5.1 приказани су резултати сопствених мерења (означени са \circ) и мерења из литературних извора (означени са \square).



Слика 5.1 Експериментални подаци – веза између броја јединица преноса и односа кинетичких енергија

Као што је напоменуто у поглављу 3, корелације из литературних извора рефлектују утицај параметара на Нуселтов број на квалитативно различит начин. Такахаши и сарадници [5.6] су дали скраћени преглед корелација и препоруке за опсег у коме корелације из различитих литературних извора могу бити коришћене.

За све доступне радне режиме (464 укупно радна режима) испуњени су следећи услови:

$$w_{Lp} \cdot (\mu_G / \sigma) \cdot (\rho_G / \rho_L)^{0,5} < 3,7 \cdot 10^{-5} \quad (5.10)$$

и

$$H_{LG} / d_o > 4,8 \cdot We_L^{0,32} \quad (5.11)$$

где су:

- w_{Lp} , m/s, почетна брзина струјања млаза;

- ρ_L , kg/m³, густина течности;
- ρ_G , kg/m³, густина паре;
- μ_L , Pa·s, динамичка вискозност течности;
- σ , J/m², површински напон;
- We_L , Веберов број за течност;
- H_{LG} , m, дужина млаза;
- d_o , m, пречник отвора на дистрибутеру.

То значи да, у складу са класификацијом из [5.6], долази до кондензације у области D у којој „ефекат површинских поремећаја није доминантан“. Такахаши и сарадници [5.6] су предложили да се у области D користе следеће корелације (назване према првом аутору публикације):

- (3.20) Такахаши [5.6],
- (3.21) Исаченко [5.7],
- (3.22) Исаченко [5.8],
- (3.26) Бенедек [5.9],
- (3.29) Дебарберис [5.11] и
- (3.30) Ичиек [5.10].

Ове корелације су упоредиве са експерименталном базом података и статистичким – параметрима који су презентовани у Табели 5.2. Од како се девијације корелираних података упоредиве са резултатима мерења и уколико су велике можемо закључити да нове корелације могу бити успостављене.

Даље анализе укључују следеће претпоставке:

- нема контракције воденог млаза тако да је пречник воденог млаза једнак пречнику отвора на дистрибутеру течности d_o (m);

- повшина контактна је израчуната помоћу израза

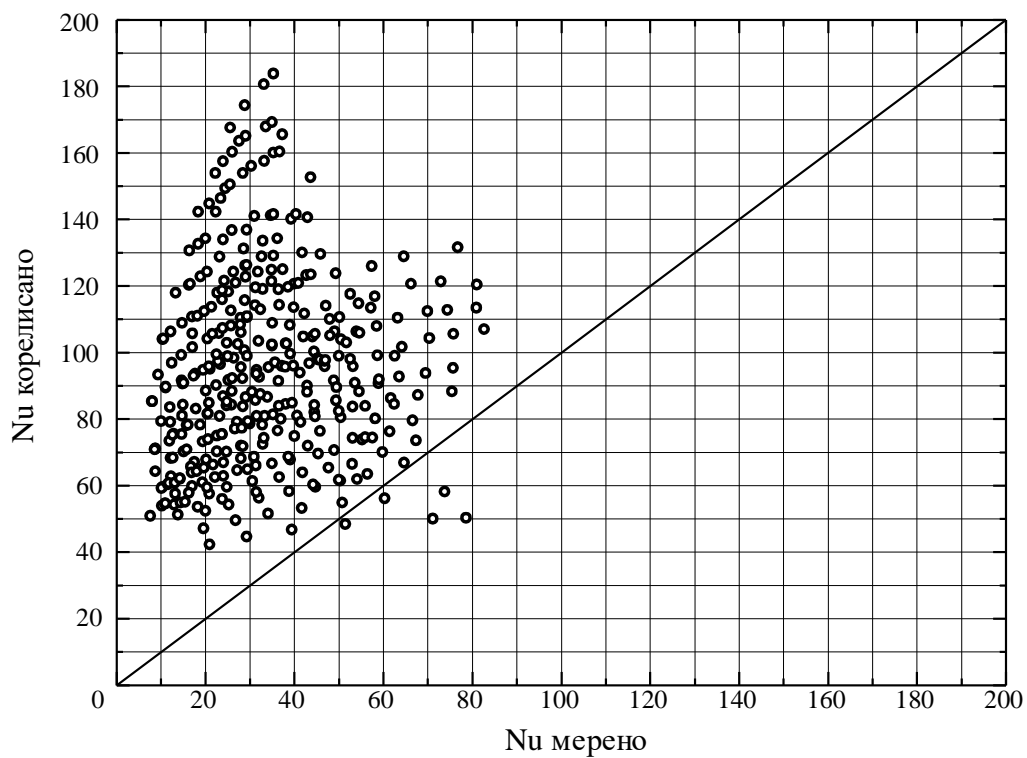
$$S_{LG} = \pi \cdot d_h \cdot H_{LG} \cdot n_o \quad (5.12)$$

где је n_o број отвора на дистрибутеру течности, а H_{LG} (m) је висина падања млаза течности (удаљеност од дистрибутера до нивоа течности у сабирном резервоару испод колоне).

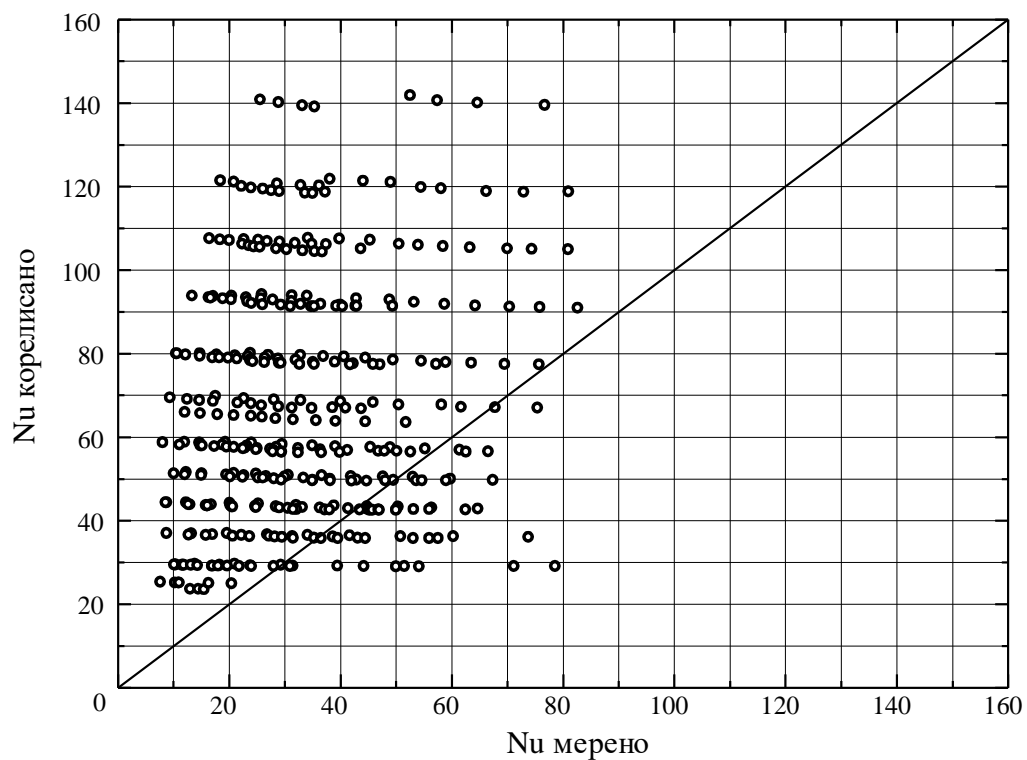
Табела 5.2 Статистички параметри корелација из литературе

Први аутор	Једначина	Θ , %	Δ_{av} , %	$maxRE^-$, %	$maxRE^+$, %
Такахашаи	(3.20)	30,1	299,2	-987,4	56,5
Исаченко	(3.21)	35,5	60,0	-205,2	90,6
Исаченко	(3.22)	11,1	55,2	-110,9	92,9
Бенедек	(3.26)	67,8	153,2	-560,8	78,4
Дебарберис	(3.29)	38,7	163,7	-567,9	87,7
Ичиек	(3.30)	–	54,2	-120,6	93,6

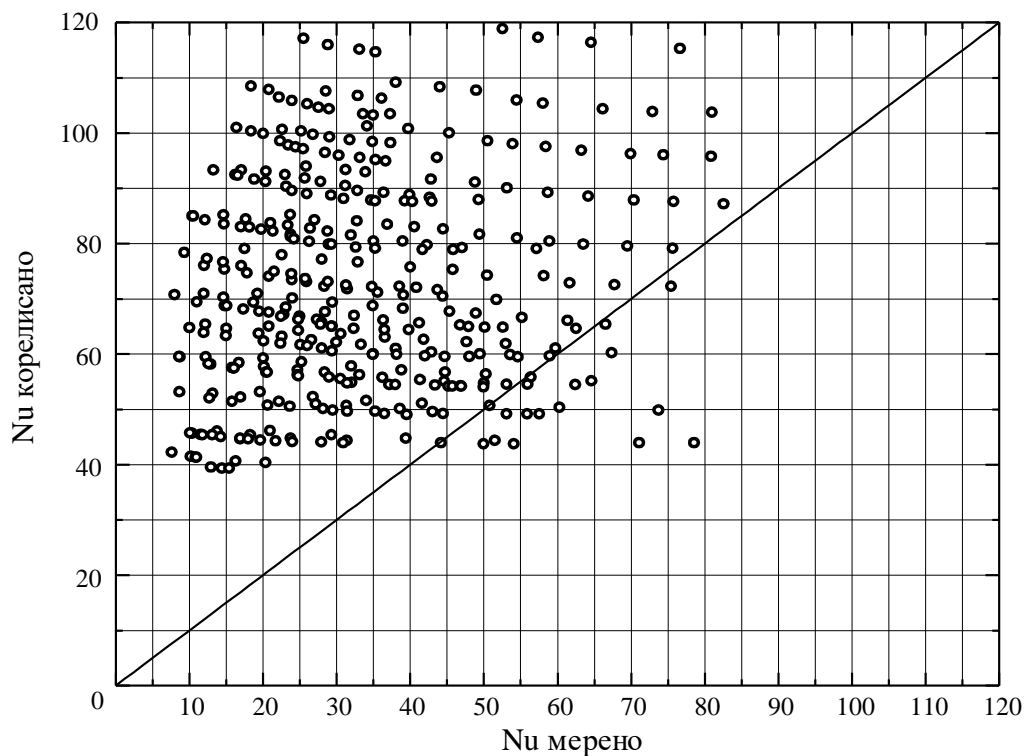
На основу података из табеле 5.2 јасно је да постојеће корелације значајно одступају од измерених података (на сликама 5.2, 5.3 и 5.4 приказана су корелациона поља за наведене једначине). Због тога се приступило изналажењу нове корелације која би боље повезивала референтне радне параметре.



Слика 5.2 Корелационо поље за (3.20)



Слика 5.3 Корелационо поље за (3.26)



Слика 5.4 Корелационо поље за (3.29)

5.6 НОВА КОРЕЛАЦИЈА ЗА ИЗРАЧУНАВАЊЕ КОЕФИЦИЈЕНТА ПРЕЛАЗА ТОПЛОТЕ У ТЕЧНОСТИ

За изналагање нове корелације коришћени су следећи димензиони бројеви:

- Рејнолдсов број

$$\text{Re}_L = \frac{w_L \cdot d_h \cdot \rho_L}{\mu_L} \quad (5.13)$$

- Прантлов број за воду

$$\text{Pr}_W = \frac{c_W \cdot \eta_W}{\lambda_W} \quad (5.14)$$

- Кутателадзев број за воду

$$\text{Ku}_W = \frac{\Delta h_W}{c_W \cdot (t_{\text{cond}} - t_{\text{Lav}})} \quad (5.15)$$

- Фрудов број за течност

$$\text{Fr}_L = \frac{w_L^2}{g \cdot d_h} \quad (5.16)$$

- Веберов број за пару и воду

$$\text{We}_G = \frac{w_L^2 \cdot \rho_G \cdot d_h}{\sigma_W} \quad (5.17)$$

$$\text{We}_W = \frac{w_L^2 \cdot \rho_W \cdot d_h}{\sigma_W} \quad (5.18)$$

где су:

- Δh_w , J/kg, топлота кондензације за воду;
- ρ_L , kg/m³, густина течности;
- ρ_w , kg/m³, густина воде;
- μ_L , Pa·s, динамичка вискозност течности;
- w_L , m/s, почетна брзина течног млаза

$$w_L = \frac{4 \cdot V_L}{\pi \cdot d_h^2 \cdot n_h} \quad (5.19)$$

У својим раним радовима Кутателадзе је увео Веберов број и за течну и за парну фазу, а његова запажања да оба Веберова броја имају утицаја на коефицијент прелаза топлоте су потврдили и други истраживачи, нпр. [5.6], [5.8] и други.

У Прантловом, Кутателадзеовом и Веберовом бездимензионом броју индекс W означава воду – кондензација паре производи танак филм воде на међуфазној површини, па су својства воде на граници фаза меродавна пре него што дође до мешања унутар млаза.

Нова корелација за израчунавање Нуселтовог броја је облика

$$\text{Nu} = 1980 \cdot \left[\text{Re}_L^{1,175} \cdot \left(\frac{\mu_L}{\mu_W} \right)^{1,175} + 17740 \right] \cdot \frac{\text{We}_G^{0,86} \cdot \text{Fr}_L^{0,23} \cdot \text{Ku}_W^{1,14}}{\text{We}_W^{0,98} \cdot \text{Pr}_W^{1,8}} \cdot \left(\frac{\rho_L}{\rho_W} \right)^{0,97} \cdot \left(\frac{\sigma_L}{\sigma_W} \right)^{-0,12} \cdot \varphi \left(\frac{H_{LG}}{d_o} \right) \quad (5.20)$$

при чему је помоћна (допунска) функција

$$\varphi \left(\frac{H_{LG}}{d_o} \right) = \frac{0,0026 - 1 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{H_{LG}}{d_o} + 5,5 \cdot 10^{-9} \cdot \left(\frac{H_{LG}}{d_o} \right)^2}{\left(\frac{H_{LG}}{d_o} \right)^{0,23}} \quad (5.21)$$

Својства течности и воде се усвајају на температури t_{Lm} . Опсег параметара за који важи корелација (5.20) је приказан у табели 5.3, а сама корелација је приказана на слици 5.5.

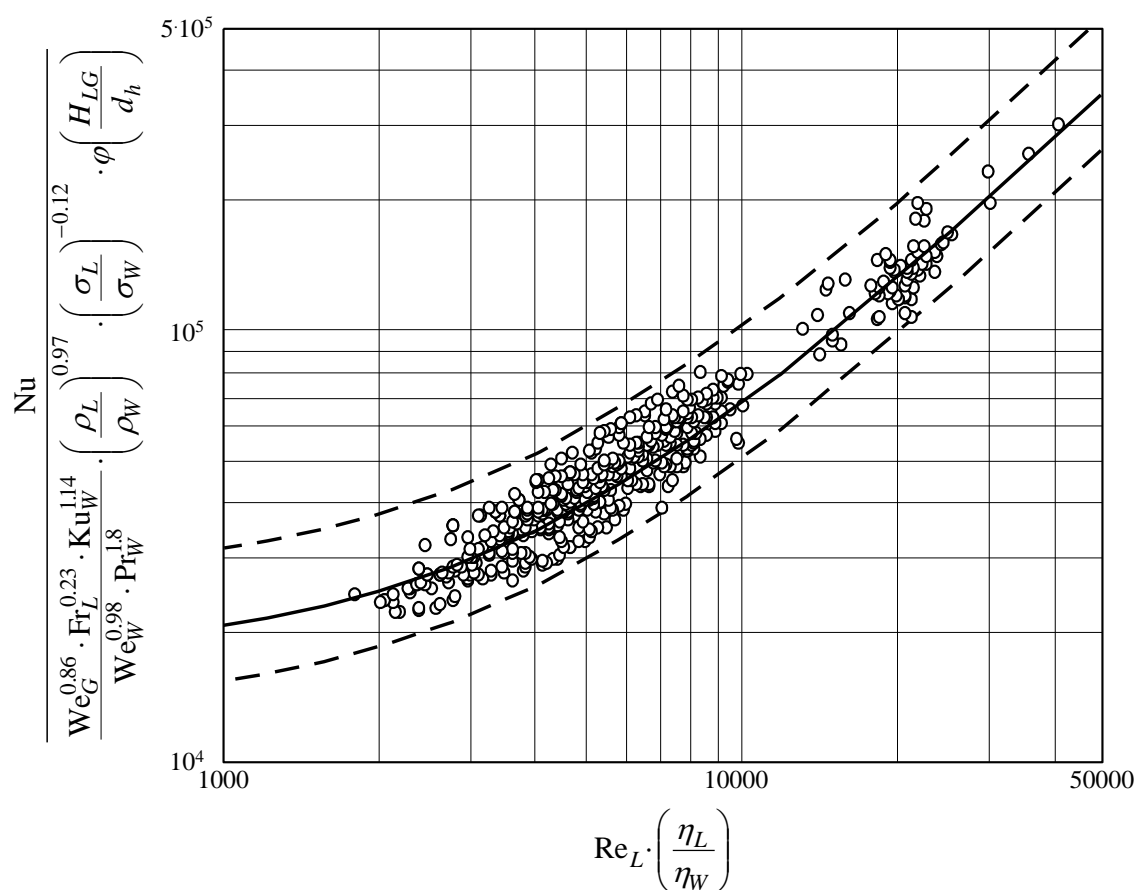
Табела 5.3 Опсег различитих параметара за корелацију (5.20)

Геометрија	Радни параметри	Бездимензиони бројеви
$D_k = 309,7 \div 1828 \text{ mm}$	$p = 14,82 \div 128,47 \text{ kPa}$	$\text{Re}_L = 1770 \div 26900$
$n_o = 95 \div 1008$	$t_{Lp} = 9,4 \div 43,0^\circ\text{C}$	$\text{Pr}_W = 3,0 \div 7,0$
$d_o = 7 \div 12,5 \text{ mm}$	$t_{Lk} = 29,8 \div 98,0^\circ\text{C}$	$\text{Ku}_W = 6,9 \div 71$
$H_{LG} = 680 \div 2708 \text{ mm}$	$w_L = 0,18 \div 1,64 \text{ m/s}$	$\text{Fr}_L = 0,49 \div 22$
$H_{LG} / d_o = 97 \div 226$	$w_G = 1,28 \div 14,6 \text{ m/s}$	$\text{We}_G = 0,002 \div 0,091$
$S_{LG} = 1,4 \div 103 \text{ m}^2$	$\text{NTU}_L = 0,25 \div 6,97$	$\text{We}_W = 3,4 \div 520$

Статистички параметри корелације (5.20) су приказани у табели 5.4. За 25 радних режима максимална одступања су већа од $\pm 30\%$, па уколико из датотеке експерименталних података занемаре ови подаци добија се на сваки начин гледано задовољавајући статистични показатељи.

Табела 5.4 Статистички параметри нове корелације (5.20)

Коментар	n	Θ , %	Δ_{av} , %	$maxRE^-$, %	$maxRE^+$, %
Комплетна база података	464	97,9	15,7	-54,2	40,0
Без режима код којих је макс. одступање веће од $\pm 30\%$	$464 - 25 = 439$	99,0	13,7	-28,3	29,6



Слика 5.5 Корелација (5.20) и експериментални подаци – испрекидане линије приказују корелационо поље од $\pm 30\%$

Са оваквом корелацијом следи да Nu опада са повећањем висине док NTU_L расте са повећањем висине $H_{LG} / d_o = 68,6$, а затим опада. Према корелацији (5.20) следи да Nu опада са повећањем висине млаза H_{LG} . Ово одговара свим корелацијама које према

[5.6] важе за област D. Са друге стране са порастом H_{LG} броја јединица преноса NTU_L такође расте све до $H_{LG} / d_o = 127$ када достиже максималну вредност. Након тога NTU_L опада са повећањем висине млаза H_{LG} . Овај феномен је последица дезинтеграције млаза:

- капи течности имају мању контактну површину од млаза;
- у зони појаве капи интензивно мешање фаза што доводи до смањења погонске силе размене топлоте (разлике температура паре и течности), а самим тим и до смањења броја јединица преноса.

Оба ефекта као последицу имају смањење броја јединица преноса у близини дна апарата. Вредности приказане у табели 5.5 (из базе података сопствених експеримената) илуструју поменути феномен.

5.7 ПРЕГЛЕД КОНСТРУКЦИОНИХ КАРАКТЕРИСТИКА ДЕГАЗАТОРА

У овом одељку биће приказане основне препоруке из литературе које се тичу конструкционих карактеристика дегазатора.

Минимална активна запремина кондензатора према [5.13] износи

$$\frac{D_k^2 \cdot \pi}{4} \cdot H_{LG} = 43,2 \cdot \dot{V}_{Lp} \quad (5.22)$$

Улаз и дистрибуција водене паре

Пара на улазу у кондензатор треба да се усмери тако да се равномерно расподели по површини попречног пресека колоне. Једна од могућности је да се пара пропушта кроз појас са рупама чија је укупна површина приближно једнака површини попречног

Табела 5.5 Зависност NTU_L од H_{LG} – по три карактеристичне вредности су груписане
ради илустрације феномена

$t_{kond}, ^\circ\text{C}$	$t_{Lp}, ^\circ\text{C}$	$t_{Lk}, ^\circ\text{C}$	$\dot{m}_{Lp}, \text{kg/s}$	$\dot{m}_G, \text{kg/s}$	H_{LG}, mm	NTU_L
97,4	10,3	66,8	0,83	0,084	1480	1,046
99,8	10,4	91,9	0,83	0,139	1080	2,426
98,7	10,4	92,0	0,83	0,139	680	2,579
98,2	10,7	41,7	1,25	0,073	1480	0,437
98,9	10,4	42,1	1,25	0,075	1080	0,443
97,8	10,4	43,1	1,25	0,075	680	0,469
97,9	10,6	42,2	1,45	0,073	1480	0,449
98,3	10,2	50,8	1,45	0,112	1080	0,618
98,1	10,2	56,2	1,45	0,127	680	0,741
105,3	11,1	72,6	1,66	0,183	1480	1,058
103,5	10,2	78,0	1,66	0,216	1080	1,297
105,3	10,0	78,5	1,66	0,225	680	1,269
97,4	10,7	33,2	1,97	0,077	1480	0,300
98,7	10,3	40,8	2,28	0,127	1080	0,423
98,2	10,1	43,2	2,28	0,141	680	0,471
98,7	10,6	32,5	2,70	0,077	1480	0,286
98,8	10,3	39,0	2,70	0,141	1080	0,392
98,4	10,0	43,4	2,70	0,147	680	0,475
97,7	10,7	27,8	3,11	0,074	1480	0,219
98,1	10,5	21,5	3,11	0,072	1080	0,134
99,3	9,8	40,8	3,11	0,165	680	0,425
98,0	10,6	28,6	3,53	0,100	1480	0,231
98,9	10,4	19,8	3,53	0,072	1080	0,112
98,5	9,8	39,8	3,53	0,177	680	0,413

пресека уводне цеви. Препоручена брзина водене паре у прикључку за довод паре, у m/s, је [5.14]

$$w_G = 161 - 10,857 \cdot \ln(p_{kond}) \quad (5.23)$$

односно према [5.15] износи 46 m/s.

Одвод течности из колоне

Конично дно колоне треба да има угао од 45° [5.15].

Пречник одводне цеви за течност на дну апарата је [5.13]

$$d_{TL} = 1,02 \cdot \sqrt{V_{Lout}} \quad (5.24)$$

а максимална брзина струјања течности је 1 ÷ 1,2 m/s.

Дистрибутер за течност

Дистрибутер за течност (на врху колоне) треба да обезбеди ниво од 200 mm течности, помоћу одговарајућег броја отвора пречника 20 ÷ 25 mm, а дубина самог дистрибутера треба да износи 450 mm до 600 mm [5.13]. Увођење течности у дистрибутер треба извести тако да се не појављује значајна разлика нивоа у самом дистрибутеру. Пречник отвора на дистрибутеру може бити и мањи (нпр. 12,5 mm) уколико течност не садржи крупне елементе чврсте фазе.

Прикључак за одвод некондензујућих гасова

Пречник прикључка се одређује према брини струјања некондензујућих гасова (укључујући и отпарак) од 8 m/s [5.15]. Мање брзине струјања се примењују уколико дегазатор ради на подпритиску, када се очекује већи прилив ваздуха из окружења.

Висина активног дела колоне

Активни део колоне је од дистрибутера течности до горње ивице прикључка за водену пару. Висина активног дела колоне је најмање 1,8 m, максимално 3 m, а уобичајено 2 m [5.15].

Ознаке

c , J/(kg·K), специфични топлотни капацитет

d, D , m, пречник

Fr , Фрудов број

g , m/s², убрзање силе теже

H , m, дужина

Ku , Кутателадзеов број

\dot{m} , kg/s, масени проток

$maxRE^+$, максимално позитивно одступање

$maxRE^-$, максимално негативно одступање

n , број

NTU , број јединица преноса

p , Pa, притисак

Pr , Прантлов број

Re , Рејнолдсов број

S , m², површина контакта

t , °C, температура

w , m/s, брзина

We , Веберов број

Δ_{av} , стандардно (средње квадратно) одступање

Δh , J/kg, топлота кондензације

λ , W/(m·K), топлотна проводност

μ , Pa·s, динамичка вискозност

ρ , kg/m³, густина

σ , J/m², површински напон

Θ , корелациони однос

Индекси

G , пара

k , крајње

k , колона

L , течност

o , отвор

p , почетно

W , вода

Литература

- [5.1] Wright P. G., Hutchinson R. T., A plant trial of direct vapor contact juice heater, Proceedings Of Australian Society Of Sugar Cane Technologists, 1980.
- [5.2] Young RC, Westmoreland AH. Primary Juice Heating By Direct Vapor Contact, Proceedings of Australian Society of Sugar Cane Technologists, 1981.
- [5.3] Генић С., Јаћимовић Б., Јарић М., Будимир Н., Својства процесних флуида, Савез машинских и електротехничких инжењера и техничара Србије, Београд, 2014.

-
- [5.4] Тарасов Ф. М., Тонкослойные теплообменные аппараты, Машиностроение, Москва, 1964.
- [5.5] VDI Heat Atlas, Springer–Verlag, Berlin Heidelberg, 2010.
- [5.6] Takahashi M., Fujinuma H., Tsukui J., Inoue A., Experimental Study on Condensation Heat Transfer on Surface of Liquid Jet, Journal of Nuclear Science and Technology, vol. 29, no. 8, pp. 721–734, 1992.
- [5.7] Isachenko V. P., Solodov A. P., Samoilovich Y. Z., Kushnyrev V. I., Sotskov S. A., Investigation of heat transfer with steam condensation on turbulent liquid jets, Teploenergetika, vol. 18, no. 2, pp. 7–10, 1971.
- [5.8] Isachenko V. P., Solodov A. P., Heat transfer with steam condensation on continuous and on dispersed jets of liquid, Teploenergetika, vol. 19, no. 9, pp. 24–27, 1972.
- [5.9] Benedek S., Heat transfer at the condensation of steam on turbulent water jet, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 19, pp. 448–450, 1976.
- [5.10] Iciek J. The hydrodynamics of a free, liquid jet and their influence on direct contact heat transfer; International Journal of Multiphase Flow; Part 1 vol. 8, no.3, pp. 239–249; Part 2, vol. 8, no. 3, pp. 251–260, Part 3 vol. 9, no. 2, pp. 167–179
- [5.11] Debarberis L., De Salve M., Panella B., Scorta G., Direct condensation of saturated steam on a liquid jet, International journal of heat and technology, vol. 5, pp. 36–54, 1987.
- [5.12] Кутателадзе С. С., Теплопередача при конденсации и кипении, Машгиз, Москва, 1952.
- [5.13] Wright P.G., Design Features For Direct Contacters And Condensers, Proc Aust Soc Sugar Cane Technol., Vol 33, 2011.

- [5.14] Hugot E., Handbook of cane sugar engineering, Elsevier, Amsterdam, 1986.
- [5.15] Hutchinson R.T., Wright P.G.: Rain Tray Condenser Design Notes, Proceedings Of Australian Society Of Sugar Cane Technologists, 1982.
- [5.16] <http://www.sugartech.co.za/viscosity/>

6 ЗАКЉУЧАК

Дегазација, односно издвајање растворених гасова из воде, представља процес који је пронашао широку употребу у процесним и термоенергетским постројењима. Ова операција има пресудну улогу у заштити котловских постројења и система даљинског грајања од негативних ефеката корозије, а у процесној индустрији се кроз дегазацију течности ослобађају нежељених гасова који имају низ негативних ефеката на рад процесних постројења. Применом поступка дегазације се из течности (најчешће воде и водених раствора) издвајају кисеоник, азот, угљендиоксид и други растворени гасови.

Међу техничким решењима која се често у индустријској пракси користе као дегазатори су и колоне са слободним (гравитационим) формирањем млазева течности – тзв. шупљи скрубери. У питању су апарати код којих нема посебних контактних елемената већ се директни контакт водене паре и течности одвија на млазевима односно капима течности који слободно падају кроз колону. Иако је у питању релативно једноставно конструкционо решење, у току израде дисертације је показано да су процедуре за димензионисање апарата овог типа су оскудне и непотпуне, а у извесној мери и нетачне.

Предмет истраживања ове докторске дисертације обухвата анализу досадашњих сазнања у области транспорта топлоте и супстанције у дегазаторима са слободним формирањем млаза течности, као и анализу сопствених експерименталних истраживања. Циљ истраживања је био да се провере постојеће, односно развију

побољшане, процедуре за прорачун процесних параметара и димензионисање предметног типа апарата.

Као основ за истраживања коришћени су експериментални подаци других аутора, као и сопствени подаци прикупљени на дегазационој колони полуиндустријског типа постављеној на топлани Коњарник у Београду. У склопу анализе експериментално добијених података, на основу резултата 464 стабилна радна режима (од тога 97 других истраживача и 367 сопствених режима) са грешком у билансу мањом од 10%. Како је документовано и закључено у Поглављу 5 постојеће прорачунске процедуре нису довољно прецизне за инжењерску праксу, односно њихова примена не обезбеђује довољну сигурност при димензионисању нових апарата, као и при контролним прорачунима постојећих апарата у различитим радним режимима.

С обзиром на овакво стање приступило се изналагању нове корелације која би на адекватан начин омогућила прецизније прорачуне апарата предметног типа. Нова корелација за израчунавање Нуселтовог броја (Nu) је облика

$$\text{Nu} = 1980 \cdot \left[\text{Re}_L^{1.175} \cdot \left(\frac{\mu_L}{\mu_W} \right)^{1.175} + 17740 \right] \cdot \frac{\text{We}_G^{0.86} \cdot \text{Fr}_L^{0.23} \cdot \text{Ku}_W^{1.14}}{\text{We}_W^{0.98} \cdot \text{Pr}_W^{1.8}} \cdot \left(\frac{\rho_L}{\rho_W} \right)^{0.97} \cdot \left(\frac{\sigma_L}{\sigma_W} \right)^{-0.12} \cdot \frac{0.0026 - 1 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{H_{LG}}{d_h} + 5.5 \cdot 10^{-9} \cdot \left(\frac{H_{LG}}{d_h} \right)^2}{\left(\frac{H_{LG}}{d_h} \right)^{0.23}} \quad (6.1)$$

Опсег параметара за који важи корелација (6.1) су следећи.

Конструкциони параметри:

- унутрашњи пречник колоне $D_k = 309,7 \div 1828 \text{ mm}$;
- број отвора на дистрибутеру $n_o = 95 \div 1008$;
- пречник отвора на дистрибутеру $d_o = 7 \div 12,5 \text{ mm}$;

- висина постављања дистрибутера у односу на ниво течности у сабирној посуди $H_{LG} = 680 \div 2708$ mm;
- однос висине дистрибутера и пречника отвора $H_{LG} / d_o = 97 \div 226$;
- површина контакта $S_{LG} = 1,4 \div 103$ m².

Радни параметри:

- радни притисак $p = 14,82 \div 128,47$ kPa;
- температура течности на улазу $t_{Lp} = 9,4 \div 43,0$ °C;
- температура течности на излазу $t_{Lk} = 29,8 \div 98,0$ °C;
- почетна брзина течности $w_L = 0,18 \div 1,64$ m/s;
- брзина паре (проток сведен на пресек колоне) $w_G = 1,28 \div 14,6$ m/s;
- број јединица преноса $NTU_L = 0,25 \div 6,97$.

Бездимензиони бројеви:

- Рејнолдсов број $Re_L = 1770 \div 26900$;
- Прантлов број $Pr_W = 3,0 \div 7,0$;
- Кутателадзеов број $Ku_W = 6,9 \div 71$;
- Фрудов број $Fr_L = 0,49 \div 22$;
- Веберов број за пару $We_G = 0,002 \div 0,091$;
- Веберов број за течност $We_W = 3,4 \div 520$.

Основни статистички параметри корелације (6.1) су следећи:

- корелациони однос 97,9%;
- средње квадратно одступање 15,7%.

Током реализације истраживања коришћене су следећи методи и технике истраживања:

- Метод систематизације и класификације захваљујући којој су, на основу прегледа литературе и анализе у њој приказаних резултата, утврђени правци и циљеви истраживања у докторској дисертацији;
- Аналитички развој математичког модела за утврђивање перформанси контактних дегазатора;
- Метод експерименталног испитивања при мерењу и одређивању меродавних параметара рада контактних дегазатора на полуиндустријској инсталацији;
- Метод анализе и статистичке обраде експерименталних резултата кроз поређење са претходним достигнућима, као и дефинисање нове корелације која је обухватила сва до сада јавно приказана истраживања.

Остварени научни допринос докторске дисертације огледа се у следећим реализованим научно–стручним остварењима:

- прегледном приказу постојећих, а посебно најновијих, научних сазнања која се односе на истраживани проблем, са нагласком на анализу оних сегмената који откривају могућности и иницирају потребу даљих научних истраживања са циљем унапређења;
- аналитичном прегледу постојећих процедура које данас могу да се користе за прорачун процесних феномена, односно димензионисање контактних дегазатора уз помоћ теорије сличности;
- уочавању потенцијалних недостатака постојећих процедура које су данас у употреби за димензионисање контактних дегазатора и разјашњењу њихових ограничења;
- развоју оригиналне и релативно једноставне процедуре за поуздано димензионисање и прорачуне везане за контактне дегазаторе.

Практична примена наведених резултата се у Србији очекује у најкраћем временском периоду имајући у виду свеобухватно сагледавање проблематике у оквиру ове дисертације, као и реалне потребе привреде.

7 ПРИЛОЗИ – РЕЗУЛТАТИ МЕРЕЊА

Ознаке

$t_G, ^\circ\text{C}$,	температура паре на улазу
$t_{Lp}, ^\circ\text{C}$,	температура течности на улазу
$t_{Lk}, ^\circ\text{C}$,	температура течности на излазу
$t_{опр}, ^\circ\text{C}$,	температура отпарка
$\Delta p_{bG}, \text{mmHg}$,	разлика притисака на бленди за пару
$q_l, \text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,	густина квашења
H_{LG}, m ,	висина дистрибутера
p, kPa	притисак у колони
$t_{kond}, ^\circ\text{C}$	температура кондензације
$m_L, \text{t/h}$	проток течности на улазу
$m_{Gp}, \text{kg/s}$	проток паре на улазу

ПРИЛОГ 1 – РЕЗУЛТАТИ МЕРЕЊА НА КОЛОНИ DN300

Број	$t_G, ^\circ\text{C}$	$t_{Lp}, ^\circ\text{C}$	$t_{Lk}, ^\circ\text{C}$	$t_{oip}, ^\circ\text{C}$	$\Delta p_{bG}, \text{mmHg}$	$q_l, \text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$	H_{LG}, mm
1	99,6	10,3	56	40,5	30	40	680
2	99,6	10,4	67	49,2	48	40	680
3	99,6	10,4	76,7	53,2	68	40	680
4	99,6	10,4	84,5	54,6	88	40	680
5	99,6	10,4	92	60	108	40	680
6	99,6	10,3	93,6	69,4	120	40	680
7	99,6	10,2	47,2	44,9	30	50	680
8	99,6	10,2	56,6	47,5	50	50	680
9	99,6	10,2	64,5	49,8	70	50	680
10	99,6	10,2	71,3	51,1	88	50	680
11	99,6	10,2	77,7	51,7	110	50	680
12	99,6	10,2	82,8	52,3	130	50	680
13	100,4	10,2	88,8	53,6	150	50	680
14	99,6	10,4	43,1	31,1	32	60	680
15	99,6	10,4	49,3	40,5	50	60	680
16	99,6	10,3	56,7	45,3	70	60	680
17	99,6	10,3	63,1	48,5	90	60	680
18	99,6	10,2	67,8	50,7	110	60	680
19	100,6	10,2	72,2	50,8	130	60	680
20	101,6	10,2	76,6	51,3	150	60	680
21	104,1	10,2	82,6	52,2	180	60	680
22	99,9	10,1	40,4	48,2	32	70	680
23	100,8	10,2	44,9	48,4	50	70	680
24	100,4	10,1	50,8	48,7	70	70	680

Број	$t_G, ^\circ\text{C}$	$t_{Lp}, ^\circ\text{C}$	$t_{Lk}, ^\circ\text{C}$	$t_{otp}, ^\circ\text{C}$	$\Delta p_{bG}, \text{mmHg}$	$q_l, \text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$	H_{LG}, mm
25	99,6	10,2	56,2	48,8	90	70	680
26	99,6	10,1	60,5	49,4	110	70	680
27	99,6	10,1	64,9	49,3	130	70	680
28	99,6	10,2	68,5	49,5	150	70	680
29	102,1	10,1	73,9	50	180	70	680
30	104,4	10,1	79,4	50,9	210	70	680
31	99,6	10,0	35,1	44,7	32	80	680
32	99,6	10,0	40	47	50	80	680
33	99,6	10,1	45,5	48,3	70	80	680
34	99,6	10,0	50,5	49,3	90	80	680
35	99,6	10,1	53,9	49,3	110	80	680
36	99,6	10,0	58,9	49,8	130	80	680
37	99,8	10,0	61,4	49,9	150	80	680
38	101,6	10,0	66,4	50,3	180	80	680
39	102,8	10,0	70,7	50,6	210	80	680
40	105	10,0	74,7	51	240	80	680
41	100,1	10,0	29,8	40,7	30	95	680
42	101,5	10,0	35	45,4	50	95	680
43	101	10,0	40	47,2	70	95	680
44	99,6	10,2	43,9	47,8	90	95	680
45	99,6	10,3	49,7	48,6	120	95	680
46	99,6	10,1	53,7	49	150	95	680
47	102,4	10,2	58	49,2	180	95	680
48	100,3	9,8	61,8	49,4	210	95	680
49	105,2	9,8	66,2	50,1	240	95	680
50	104,8	9,8	69,4	50,3	270	95	680
51	104,3	9,8	73,1	50,7	300	95	680
52	99,6	10,2	33	42,4	50	110	680
53	102,4	10,1	36,1	44,6	70	110	680

Број	$t_G, ^\circ\text{C}$	$t_{Lp}, ^\circ\text{C}$	$t_{Lk}, ^\circ\text{C}$	$t_{otp}, ^\circ\text{C}$	$\Delta p_{bG}, \text{mmHg}$	$q_l, \text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$	H_{LG}, mm
54	99,6	9,6	39,8	46	90	110	680
55	99,6	10,1	43,2	46,5	110	110	680
56	99,6	9,9	45,7	47	130	110	680
57	99,6	9,6	48,2	47,2	150	110	680
58	101,1	10,2	52,3	47,5	180	110	680
59	102,6	9,8	55,9	47,9	210	110	680
60	103,7	9,7	58,9	47,9	240	110	680
61	104,2	10,1	61,9	47,8	270	110	680
62	103,8	10,2	65	48	300	110	680
63	104	9,9	68,1	48,9	330	110	680
64	99,6	10,2	31,8	30,5	50	130	680
65	99,6	9,6	35,3	37,3	70	130	680
66	99,6	9,7	37	38,6	90	130	680
67	99,6	10	43,4	42,8	120	130	680
68	99,6	9,7	46,9	44,2	150	130	680
69	101,7	10,2	50,5	45,6	176	130	680
70	103,5	9,6	54	31,5	210	130	680
71	104	10,1	57,5	46,9	240	130	680
72	104,9	9,7	61	47	270	130	680
73	104,9	9,6	63,6	47,2	300	130	680
74	104,7	9,6	66,7	47,2	330	130	680
75	100,8	9,7	34,4	41,8	90	150	680
76	99,6	9,7	37,5	41	120	150	680
77	99,6	9,8	40,8	39,8	150	150	680
78	102,8	10,1	45	40	180	150	680
79	104,2	9,5	46,9	40,1	210	150	680
80	104,3	9,7	49,5	40,1	240	150	680
81	105,1	9,6	52,3	40,6	270	150	680
82	105,2	9,4	55,8	41,5	300	150	680

Број	$t_G, ^\circ\text{C}$	$t_{Lp}, ^\circ\text{C}$	$t_{Lk}, ^\circ\text{C}$	$t_{otp}, ^\circ\text{C}$	$\Delta p_{bG}, \text{mmHg}$	$q_l, \text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$	H_{LG}, mm
83	104,5	9,4	57,6	42	330	150	680
84	103,7	9,4	60,4	42,8	350	150	680
85	99,6	9,8	33,9	38,9	110	170	680
86	99,6	9,8	37,2	38,4	140	170	680
87	99,6	9,8	39,8	38	170	170	680
88	104,5	9,8	44,1	38,1	210	170	680
89	105,3	9,8	46	38,5	250	170	680
90	106	9,8	50,5	39,5	290	170	680
91	105,1	9,8	53,4	40,4	330	170	680
92	102,9	9,8	56,3	40,7	350	170	680
93	99,6	9,8	37,6	34,5	200	200	680
94	104,2	9,8	41	35,4	250	200	680
95	104,7	9,7	44,4	36,8	300	200	680
96	103,8	9,8	49,7	38,1	350	200	680
97	99,6	10,4	57,4	32,3	32	40	1080
98	99,6	10,4	66,6	41,1	48	40	1080
99	99,6	10,4	75,2	46,4	66	40	1080
100	99,6	10,4	83,6	47,6	86	40	1080
101	99,8	10,4	91,9	49,5	108	40	1080
102	100,8	10,4	94,9	52,9	118	40	1080
103	100,6	10,4	95,9	59,3	122	40	1080
104	99,6	10,6	49,4	26,6	32	50	1080
105	99,6	10,5	57,1	30,9	48	50	1080
106	99,6	10,5	65,9	34,3	70	50	1080
107	99,6	10,5	72,6	36,9	90	50	1080
108	99,6	10,5	77,2	39,3	106	50	1080
109	100,4	10,5	84	40,6	130	50	1080
110	102,9	10,5	88,8	42	148	50	1080
111	103,6	10,4	94,4	44,2	172	50	1080

Број	$t_G, ^\circ\text{C}$	$t_{Lp}, ^\circ\text{C}$	$t_{Lk}, ^\circ\text{C}$	$t_{otp}, ^\circ\text{C}$	$\Delta p_{bG}, \text{mmHg}$	$q_l, \text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$	H_{LG}, mm
112	103,6	10,5	95,4	47,5	182	50	1080
113	103,4	10,4	95,7	50,8	190	50	1080
114	99,6	10,4	42,1	29,5	32	60	1080
115	99,6	10,3	50,9	30,4	52	60	1080
116	99,6	10,3	56,8	31,1	68	60	1080
117	99,6	10,3	63,5	33,3	90	60	1080
118	99,6	10,3	68,2	34,9	108	60	1080
119	100,2	10,3	73,7	36	130	60	1080
120	101,5	10,3	77,4	37,2	148	60	1080
121	102,6	10,3	82,3	38,3	172	60	1080
122	103,3	10,3	85,1	39,3	188	60	1080
123	103,8	10,2	88,7	40,6	210	60	1080
124	104,4	10,2	90,8	41,9	220	60	1080
125	104,2	10,2	92	43,8	228	60	1080
126	103,9	10,2	94,4	46,5	240	60	1080
127	99,6	10,1	38,2	28,8	32	70	1080
128	99,6	10,2	43,4	29,5	48	70	1080
129	99,6	10,2	50,8	30,7	70	70	1080
130	99,6	10,2	55,4	31,8	90	70	1080
131	99,6	10,2	60,9	33,2	110	70	1080
132	99,6	10,2	64,9	34,6	130	70	1080
133	100,4	10,2	68,9	35,2	150	70	1080
134	102,1	10,2	74,4	36,7	178	70	1080
135	103,8	10,2	79,4	38,1	210	70	1080
136	103,4	10,2	83,8	39,6	240	70	1080
137	103,8	10,2	86,5	40,8	260	70	1080
138	103,7	10,2	89,2	42,1	278	70	1080
139	99,6	10,2	34,8	25,2	32	80	1080
140	99,6	10,2	39,3	27,9	48	80	1080

Број	$t_G, ^\circ\text{C}$	$t_{Lp}, ^\circ\text{C}$	$t_{Lk}, ^\circ\text{C}$	$t_{otp}, ^\circ\text{C}$	$\Delta p_{bG}, \text{mmHg}$	$q_l, \text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$	H_{LG}, mm
141	99,6	10,2	45,9	29,3	70	80	1080
142	99,6	10,2	52,1	30,3	98	80	1080
143	99,6	10,2	58,8	32,3	130	80	1080
144	101,2	10,2	63,9	33,4	160	80	1080
145	103,1	10,2	68,9	34,8	190	80	1080
146	103,5	10,2	73,6	36,1	220	80	1080
147	103,5	10,2	78	37,6	250	80	1080
148	103,9	10,2	82,2	38,9	280	80	1080
149	102,8	10,2	87	10,9	300	80	1080
150	99,6	10,6	33,1	23,1	30	90	1080
151	99,6	10,6	37,1	26,3	50	90	1080
152	99,6	10,6	41,6	30,9	70	90	1080
153	99,6	10,5	45,6	34,2	90	90	1080
154	99,6	10,5	49,7	34,9	112	90	1080
155	100	10,5	52,2	34,7	128	90	1080
156	102,2	10,5	55,9	35,1	150	90	1080
157	102,9	10,4	59,6	35,7	180	90	1080
158	103,1	10,4	64	35,4	210	90	1080
159	103,9	10,4	67,7	35,8	240	90	1080
160	102,7	10,4	71,7	35,6	270	90	1080
161	102,8	10,4	77,3	35,5	300	90	1080
162	100,4	10,3	32,8	30,9	50	110	1080
163	100,2	10,3	36,7	31,2	70	110	1080
164	99,6	10,3	40,8	30,8	90	110	1080
165	99,6	10,3	43,5	30,8	110	110	1080
166	99,6	10,3	47	30,6	130	110	1080
167	100,2	10,3	49,8	30,6	150	110	1080
168	101,1	10,3	53,3	30,9	180	110	1080
169	103,9	10,3	57,5	30,9	210	110	1080

Број	$t_G, ^\circ\text{C}$	$t_{Lp}, ^\circ\text{C}$	$t_{Lk}, ^\circ\text{C}$	$t_{otp}, ^\circ\text{C}$	$\Delta p_{bG}, \text{mmHg}$	$q_l, \text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$	H_{LG}, mm
170	101,9	10,3	60,3	31,6	240	110	1080
171	103,3	10,3	63,8	32,7	270	110	1080
172	103,4	10,3	67,8	33,5	300	110	1080
173	100,4	10,3	73,3	34,9	330	110	1080
174	102,8	10,3	33	29,4	70	130	1080
175	99,6	10,3	36,2	29,6	90	130	1080
176	99,6	10,3	39	29,8	110	130	1080
177	100	10,2	41,9	30,1	130	130	1080
178	100,8	10,2	44,3	30,6	150	130	1080
179	102	10,2	48,0	31,5	180	130	1080
180	104,9	10,2	50,4	32,2	210	130	1080
181	103,4	10,2	53,2	32,6	240	130	1080
182	103,2	10,2	56,2	33,1	270	130	1080
183	103,9	10,2	58,8	34	300	130	1080
184	102,2	10,2	63,4	34,3	330	130	1080
185	102,4	10,4	35,2	27	160	150	1080
186	101,4	10,4	37,4	27,1	190	150	1080
187	102,7	10,4	39,1	27,2	220	150	1080
188	102,9	10,4	41,2	27,6	250	150	1080
189	102,7	10,4	43,7	27,5	280	150	1080
190	101,9	10,4	46,2	27,2	310	150	1080
191	101	10,4	48,1	27,1	330	150	1080
192	102,8	10,4	37,8	30	250	170	1080
193	102,5	10,4	41,4	30	300	170	1080
194	101,7	10,4	43,9	30	330	170	1080
195	99,6	10,7	74,7	48	26	32	1480
196	99,6	10,7	77,8	49,8	32	32	1480
197	99,6	10,7	78,6	49,9	46	32	1480
198	99,6	10,7	53,6	37,4	20	34	1480

Број	$t_G, ^\circ\text{C}$	$t_{Lp}, ^\circ\text{C}$	$t_{Lk}, ^\circ\text{C}$	$t_{otp}, ^\circ\text{C}$	$\Delta p_{bG}, \text{mmHg}$	$q_l, \text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$	H_{LG}, mm
199	99,6	10,7	65	41,8	20	34	1480
200	99,6	10,7	67	43,5	22	34	1480
201	99,6	10,7	67,4	45,1	22	34	1480
202	99,6	10,8	79,5	47,1	40	34	1480
203	99,6	10,7	85,7	47,8	50	34	1480
204	99,6	12,1	60,5	32,8	24	40	1480
205	99,6	12,1	59,5	35,3	24	40	1480
206	99,6	12,1	63,4	42,5	32	40	1480
207	99,6	12,2	64,2	43	32	40	1480
208	99,6	10,3	66,8	45	40	40	1480
209	99,6	10,3	66,8	45,1	40	40	1480
210	99,6	11,3	69,7	46	46	40	1480
211	99,6	11,5	69,7	46,1	46	40	1480
212	99,6	11,8	75,5	46,5	54	40	1480
213	99,6	11,7	75,5	46,6	54	40	1480
214	99,6	11,6	77,2	46,8	60	40	1480
215	99,6	11,7	80,3	47	60	40	1480
216	99,6	11,7	83,5	47,6	60	40	1480
217	99,6	11,9	86	47,9	68	40	1480
218	99,6	11,8	89,9	48,5	68	40	1480
219	99,6	11,7	91,8	49	76	40	1480
220	99,6	10,9	46,3	33,5	30	50	1480
221	99,6	10,9	58,1	35,6	50	50	1480
222	99,6	10,9	65,2	37,1	68	50	1480
223	99,6	10,9	74	38,6	94	50	1480
224	99,6	10,9	78,3	41	110	50	1480
225	99,8	10,9	83,5	42,6	132	50	1480
226	101,2	10,9	85,8	43,2	140	50	1480
227	102,1	10,9	88,2	44	150	50	1480

Број	$t_G, ^\circ\text{C}$	$t_{Lp}, ^\circ\text{C}$	$t_{Lk}, ^\circ\text{C}$	$t_{otp}, ^\circ\text{C}$	$\Delta p_{bG}, \text{mmHg}$	$q_l, \text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$	H_{LG}, mm
228	101,6	10,9	90,6	44,5	162	50	1480
229	103,7	10,8	93,1	44,8	170	50	1480
230	103,9	10,9	95	45,8	180	50	1480
231	102,6	10,9	96,1	56	192	50	1480
232	99,6	10,7	41,7	22,4	30	60	1480
233	99,6	10,6	41,7	27,1	30	60	1480
234	99,6	10,6	41,2	28,1	30	60	1480
235	99,6	10,6	53	32	52	60	1480
236	99,6	10,6	52,3	33,9	52	60	1480
237	99,6	10,6	59,4	36,8	72	60	1480
238	99,6	10,6	59,9	37,1	72	60	1480
239	99,6	10,6	60,1	37,6	72	60	1480
240	99,6	10,6	68,2	39,5	96	60	1480
241	99,6	10,6	68,5	39,9	96	60	1480
242	99,6	10,5	74,5	40,5	120	60	1480
243	100,6	10,5	75,3	41,2	120	60	1480
244	100,1	10,5	79,7	42	148	60	1480
245	100,9	10,5	81,9	42,7	154	60	1480
246	104,1	10,5	85,6	43,7	170	60	1480
247	105	10,5	85,6	44	170	60	1480
248	105,3	10,5	90,8	45	192	60	1480
249	105	10,5	91,1	44,8	198	60	1480
250	104,7	10,4	94,3	45,5	210	60	1480
251	105,4	10,5	95,9	47,7	210	60	1480
252	105,1	10,4	95,9	48,8	210	60	1480
253	104,7	10,4	96,1	49,7	210	60	1480
254	104,9	10,4	96,2	50,8	220	60	1480
255	105,5	10,4	98	73,7	226	60	1480
256	99,6	10,6	42,2	24,3	30	70	1480

Број	$t_G, ^\circ\text{C}$	$t_{Lp}, ^\circ\text{C}$	$t_{Lk}, ^\circ\text{C}$	$t_{otp}, ^\circ\text{C}$	$\Delta p_{bG}, \text{mmHg}$	$q_l, \text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$	H_{LG}, mm
257	101,8	10,7	47,2	26,9	50	70	1480
258	99,7	10,6	53	29	70	70	1480
259	99,6	10,6	62,8	31,7	100	70	1480
260	99,6	10,7	66,5	31,9	116	70	1480
261	99,6	10,7	70,1	32,5	140	70	1480
262	99,6	10,6	71,4	32,8	142	70	1480
263	101,3	10,7	74,8	33,6	160	70	1480
264	103,5	10,7	77,6	34,3	178	70	1480
265	103,8	10,7	83,6	35	210	70	1480
266	104,1	10,7	83,6	35,3	218	70	1480
267	103,4	10,7	85,8	36,6	238	70	1480
268	104	10,7	89	37,2	260	70	1480
269	104	10,7	90,7	38,6	270	70	1480
270	103,2	10,7	91,9	39	280	70	1480
271	102,8	10,7	94,6	41,3	282	70	1480
272	101,9	11	33,9	41	30	80	1480
273	101,8	11	34	40,1	30	80	1480
274	102,2	11	41,5	38,8	50	80	1480
275	102,5	11	41,5	38,2	50	80	1480
276	99,6	11	49	37,9	72	80	1480
277	99,6	11	49,6	37,9	74	80	1480
278	99,6	11	53,8	38,1	90	80	1480
279	99,6	11	57,4	38,3	110	80	1480
280	99,6	11	59,7	38,4	116	80	1480
281	99,6	11	62,8	38,6	132	80	1480
282	101,4	11	63,1	38,8	132	80	1480
283	99,7	11	65,8	39	152	80	1480
284	102,7	11	67,2	39,2	152	80	1480
285	101,3	11	69,7	39,4	172	80	1480

Број	$t_G, ^\circ\text{C}$	$t_{Lp}, ^\circ\text{C}$	$t_{Lk}, ^\circ\text{C}$	$t_{otp}, ^\circ\text{C}$	$\Delta p_{bG}, \text{mmHg}$	$q_l, \text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$	H_{LG}, mm
286	103,5	11	71,8	39,6	180	80	1480
287	105,3	11,1	72,6	39,7	184	80	1480
288	106,2	11	75	40,2	198	80	1480
289	106,4	11	75	40,3	200	80	1480
290	106,9	10,4	78,7	40,6	220	80	1480
291	106,2	10,4	82,7	41	238	80	1480
292	104,8	10,4	84,6	42	254	80	1480
293	100,7	10,4	87,2	43,4	264	80	1480
294	100,7	10,4	88,4	43,4	268	80	1480
295	99,6	10,7	33,2	27,1	34	95	1480
296	99,6	10,7	39,6	27,3	56	95	1480
297	99,6	10,7	43,7	27,8	74	95	1480
298	99,6	10,7	48	28	98	95	1480
299	99,6	10,7	55,2	28,2	134	95	1480
300	99,6	10,7	58,5	28,7	160	95	1480
301	102,4	10,7	62,2	29,2	188	95	1480
302	103	10,7	66,4	29,7	222	95	1480
303	104,5	10,7	70	30,5	254	95	1480
304	104,2	10,7	73,8	30,7	278	95	1480
305	101,9	10,7	76	30,7	300	95	1480
306	101,9	10,8	78,1	30,9	308	95	1480
307	102,7	10,7	80,9	31,3	326	95	1480
308	99,6	11,7	33,1	19,2	48	110	1480
309	99,6	11,7	33,3	19,7	50	110	1480
310	99,6	12	36,4	22,7	64	110	1480
311	99,6	11,9	40,7	24,3	88	110	1480
312	99,6	11,5	44,2	25,9	108	110	1480
313	99,6	10,7	45,5	27,1	122	110	1480
314	99,6	10,7	47,9	27,8	138	110	1480

Број	$t_G, ^\circ\text{C}$	$t_{Lp}, ^\circ\text{C}$	$t_{Lk}, ^\circ\text{C}$	$t_{otp}, ^\circ\text{C}$	$\Delta p_{bG}, \text{mmHg}$	$q_l, \text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$	H_{LG}, mm
315	99,6	10,6	50,1	28,2	156	110	1480
316	99,6	10,6	53,6	28,4	178	110	1480
317	101,5	10,6	54,3	28,4	182	110	1480
318	103,3	10,6	55,4	28,5	200	110	1480
319	103,8	10,6	58,4	29	226	110	1480
320	103,7	10,6	61,7	29,2	256	110	1480
321	103,5	10,7	62,1	29,2	260	110	1480
322	103,6	10,6	66,2	29,2	278	110	1480
323	102,7	10,6	68,6	29,3	298	110	1480
324	101	10,6	73,8	29,4	324	110	1480
325	99,6	10,6	76,2	29,4	340	110	1480
326	100,1	10,6	34,7	27	54	130	1480
327	99,6	10,6	39	26,6	82	130	1480
328	99,6	10,6	39,5	26,6	84	130	1480
329	99,6	10,6	42,8	26,3	102	130	1480
330	99,6	10,6	44,9	26,2	116	130	1480
331	100,8	10,6	48,9	26,3	154	130	1480
332	103,6	10,6	50,8	26,1	172	130	1480
333	104,3	10,6	53,4	25,8	208	130	1480
334	102,7	10,6	56,7	25,7	248	130	1480
335	104,3	10,6	59,3	25,6	274	130	1480
336	102,8	10,6	62,8	25,6	296	130	1480
337	102,8	10,6	63,4	25,6	298	130	1480
338	100,5	10,6	66,1	25,4	324	130	1480
339	100,9	10,6	67,3	25,4	332	130	1480
340	99,6	10,6	68,8	24,9	344	130	1480
341	99,6	10,7	35,9	25,5	90	150	1480
342	99,6	10,7	38,5	27,6	110	150	1480
343	99,6	10,7	40,6	28,3	128	150	1480

Број	$t_G, ^\circ\text{C}$	$t_{Lp}, ^\circ\text{C}$	$t_{Lk}, ^\circ\text{C}$	$t_{otp}, ^\circ\text{C}$	$\Delta p_{bG}, \text{mmHg}$	$q_l, \text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$	H_{LG}, mm
344	103	10,7	44,5	29,5	160	150	1480
345	104,8	10,7	46,4	29,3	180	150	1480
346	106	10,6	47,8	29	200	150	1480
347	106,1	10,6	49,1	28,9	216	150	1480
348	106,3	10,7	52,8	28,8	250	150	1480
349	106,6	10,6	54,9	28,9	280	150	1480
350	106	10,6	58	28,7	300	150	1480
351	106,3	10,6	60,4	28,1	320	150	1480
352	105,9	10,7	61,7	27,7	330	150	1480
353	99,6	10,6	65,1	27,2	340	150	1480
354	99,6	10,6	35,7	28,1	110	170	1480
355	99,6	10,6	38,5	39,2	142	170	1480
356	104	10,6	41,2	29,8	170	170	1480
357	105	10,6	43,4	30	200	170	1480
358	105,4	10,5	45,9	30,2	226	170	1480
359	106,3	10,6	47,9	30,1	254	170	1480
360	106,4	10,5	49,5	30,1	270	170	1480
361	105,6	10,5	54,3	29,8	306	170	1480
362	105,6	10,5	55,7	29,6	320	170	1480
363	102,9	10,6	56,9	29,2	330	170	1480
364	100,1	12,7	41,3	25,7	200	200	1480
365	101,9	12,7	44,9	26,2	252	200	1480
366	104,5	10,6	48,6	26,7	306	200	1480
367	105,1	10,5	50,8	26,8	334	200	1480

ПРИЛОГ 2 – РЕЗУЛТАТИ МЕРЕЊА НА КОЛОНИ DN900

Wright P. G., Hutchinson R. T., A plant trial of direct vapor contact juice heater, Proceedings Of Australian Society Of Sugar Cane Technologists, 1980.

Пречник колоне $D_k = 910 \text{ mm}$

Број отвора на дистрибутеру течности $n_o = 290$

Пречник отвора на дистрибутеру течности $d_o = 12,5 \text{ mm}$

Висина постављања дистрибутера $H_{LG} = 1825 \text{ mm}$

Број	p , kPa	t_{kond} , °C	t_{Lp} , °C	t_{Lk} , °C	m_L , t/h	m_{Gp} , kg/s
1	29,9	69,05	35,0	65,9	41,6	0,538
2	28,4	67,86	35,7	66,4	62,0	0,799
3	27,5	67,13	36,7	65,7	78,0	0,949
4	29,9	69,05	36,9	66,6	45,0	0,561
5	29,6	68,81	36,2	67,1	44,0	0,571
6	29,6	68,81	38,1	66,4	46,5	0,552
7	29,9	69,05	38,4	67,7	47,2	0,582
8	29,9	69,05	38,9	67,7	48,2	0,584
9	27,5	67,13	39,3	66,4	75,7	0,862
10	25,5	65,42	39,8	63,9	85,4	0,862
11	25,5	65,42	40,1	64,8	83,1	0,861
12	29,2	68,50	40,1	66,4	45,8	0,506
13	28,8	68,19	40,1	66,4	45,3	0,500
14	25,1	65,07	40,5	63,9	45,1	0,442
15	22,8	62,93	39,8	60,3	44,1	0,377
16	23,7	63,78	39,6	60,1	42,5	0,363
17	29,2	68,50	40,0	65,7	42,1	0,454
18	29,2	68,50	40,3	65,3	43,1	0,452

Број	p , kPa	t_{kond} , °C	t_{Lp} , °C	t_{Lk} , °C	m_L , t/h	m_{Gp} , kg/s
19	28,8	68,19	40,0	65,6	41,0	0,440
20	18,4	58,26	40,1	54,2	40,4	0,236
21	24,4	64,43	40,8	61,3	39,6	0,339
22	21,1	61,22	40,8	58,3	39,8	0,290
23	28,8	68,19	40,5	65,9	40,4	0,431

ПРИЛОГ 3 – РЕЗУЛТАТИ МЕРЕЊА НА КОЛОНИ DN900

Wright P. G., Hutchinson R. T., A plant trial of direct vapor contact juice heater, Proceedings Of Australian Society Of Sugar Cane Technologists, 1980.

Пречник колоне	$D_k = 910 \text{ mm}$
Број отвора на дистрибутеру течности	$n_o = 200$
Пречник отвора на дистрибутеру течности	$d_o = 12,5 \text{ mm}$
Висина постављања дистрибутера	$H_{LG} = 1825 \text{ mm}$

Број	p , kPa	t_{kond} , °C	t_{Lp} , °C	t_{Lk} , °C	m_L , t/h	m_{Gp} , kg/s
1	30,5	69,51	39,3	68,6	75	0,925
2	31,2	70,03	40,3	69,8	75	0,934
3	24,8	64,80	40,8	63,9	75	0,726
4	24,8	64,80	40,8	63,5	75	0,713
5	25,1	65,07	40,8	63,9	75	0,726
6	31,2	70,03	41,7	69,5	75	0,880
7	21,1	61,22	41,3	60,0	75	0,585
8	20,7	60,80	41,0	59,5	75	0,579
9	25,1	65,07	41,0	62,9	75	0,687
10	27,5	67,13	41,5	65,8	73	0,745
11	23,7	63,78	37,5	62,7	112	1,180
12	24,1	64,16	38,7	62,7	112	1,124
13	31,6	70,33	39,0	69,2	49	0,623
14	23,5	63,60	38,4	61,9	49	0,481
15	20,7	60,80	38,7	58,3	58	0,473
16	20,0	60,06	38,9	57,2	55	0,418
17	23,5	63,60	40,3	63,1	130	1,242

Број	p , kPa	t_{kond} , °C	t_{Lp} , °C	t_{Lk} , °C	m_L , t/h	m_{Gp} , kg/s
18	20,0	60,06	40,3	59,7	153	1,239
19	41,3	76,68	37,7	74,9	64	1,009
20	41,7	76,92	38,0	76,0	64	1,032
21	41,3	76,68	38,0	75,9	64	1,030
22	36,9	73,98	38,5	73,3	64	0,943
23	36,9	73,98	38,5	72,7	64	0,926
24	34,3	72,24	38,7	69,6	64	0,833
25	34,3	72,24	38,7	69,5	64	0,830
26	40,7	76,33	39,6	75,2	64	0,966
27	41,3	76,68	37,8	71,3	34	0,479
28	41,3	76,68	37,5	71,3	34	0,484
29	39,7	75,73	38,8	75,4	75	1,165
30	19,7	59,73	36,1	57,3	73	0,643
31	25,5	65,42	38,6	63,7	74	0,777
32	25,5	65,42	39,8	63,9	87	0,878
33	26,8	66,54	39,1	63,9	55	0,571
34	30,9	69,81	39,3	67,1	55	0,642
35	25,1	65,07	39,6	63,7	67	0,676
36	25,5	65,42	39,6	63,9	66	0,672

ПРИЛОГ 4 – РЕЗУЛТАТИ МЕРЕЊА НА КОЛОНИ DN1800

Young R. C., Westmoreland A. H., Primary Juice Heating By Direct Vapor Contact, Proceedings of Australian Society of Sugar Cane Technologists, 1981.

Пречник колоне	$D_k = 1828 \text{ mm}$
Број отвора на дистрибутеру течности	$n_o = 1008$
Пречник отвора на дистрибутеру течности	$d_o = 12 \text{ mm}$
Висина постављања дистрибутера	$H_{LG} = 2708 \text{ mm}$

Број	p , kPa	t_{kond} , °C	t_{LP} , °C	t_{Lk} , °C	m_L , t/h	m_{Gp} , kg/s
1	20,23	60,3	38,2	54,6	395,5	2,68
2	20,41	60,5	38,3	54,7	381,2	2,58
3	20,23	60,3	39,1	54,7	410,0	2,64
4	20,79	60,9	36,4	51,8	399,0	2,53
5	24,69	64,7	37,2	57,9	368,0	3,16
6	20,23	60,3	39,1	54,7	355,9	2,30
7	17,43	57,1	41,7	52,3	345,9	1,51
8	14,82	53,7	41,2	50,1	388,6	1,43
9	24,80	64,8	39,3	57,0	368,2	2,70
10	20,79	60,9	36,4	51,8	358,7	2,27
11	20,23	60,3	38,7	52,6	407,7	2,33
12	20,32	60,4	37,6	52,1	390,8	2,33
13	51,24	82,0	43,0	76,7	395,5	5,65
14	57,23	84,8	35,7	77,0	381,2	6,66
15	52,06	82,4	34,5	76,2	410,0	7,23
16	52,69	82,7	40,3	76,4	399,0	6,10
17	43,24	77,8	36,5	74,7	368,0	5,95

Број	p , kPa	t_{kond} , °C	t_{Lp} , °C	t_{Lk} , °C	m_L , t/h	m_{Gp} , kg/s
18	45,23	78,9	35,1	75,5	355,9	6,08
19	45,97	79,3	40,9	76,9	345,9	5,29
20	62,83	87,2	35,2	83,5	388,6	8,01
21	51,65	82,2	34,5	76,1	368,2	6,47
22	52,90	82,8	36,2	71,6	358,7	5,32
23	52,06	82,4	36,3	63,1	407,7	4,51
24	57,01	84,7	35,1	58,4	390,8	3,72
25	19,31	59,3	39,1	54,0	423,4	2,61
26	19,31	59,3	39,4	53,4	417,9	2,42
27	20,98	61,1	38,5	53,7	429,5	2,69
28	20,98	61,1	38,7	55,1	412,1	2,79
29	20,60	60,7	39,4	55,9	398,0	2,72
30	20,32	60,4	39,5	55,5	432,4	2,87
31	20,32	60,4	38,6	55,0	471,5	3,20
32	21,27	61,4	39,0	56,3	460,1	3,30
33	20,60	60,7	39,4	56,0	447,6	3,08
34	19,67	59,7	38,4	53,9	442,4	2,83
35	19,67	59,7	38,8	54,9	411,0	2,74
36	19,67	59,7	39,5	54,0	384,1	2,30
37	20,32	60,4	40,5	53,7	407,5	2,22

БИОГРАФИЈА

Бранка Б. Раданов је рођена 27.децембра 1974 године у Сарајеву, где је завршила основну школу и II сарајевску гимназију на математичко-програмерском смеру са одличним успехом. XIII Београдску гимназију (завршну годину) математичко-програмерског усмерења је завршила такође са одличним успехом.

Машински факултет Универзитета у Београду је уписала школске 1993/1994 године а дипломирала је 2001. године на Одсеку за процесну технику. Завршни испит положила је са оценом 10 из предмета Топлотни и дифузиони апарати. Последипломске студије уписала је 2002 године на Одсеку за индустријско инжењерство Машинског факултета Универзитета у Београду. Одбранила је магистарску тезу на Машинском факултету 2009. године.

У тадашњем Заводу за мере и драгоцене метале запослила се 2001 године као метролог, приправник у Групи за масу силу и притисак. После положеног државног испита радила је као метролог у Метролошко развојном сектору. Учествовала је у развојним пројектима у области метрологије масе и силе. Као вођа пројекта "Развој метрологије претходно упакованих производа" дала је велики допринос развоју законске метрологије Републике Србије, који је препознат добијањем међународне награде за Законску метрологију коју је добила Дирекција за мере и драгоцене метале, односно објављивањем чланка аутора Бранке Б.Раданов у часопису Међународне Организације за законску метрологију "Realization of the project Development of a system for prepackage control" у јулу 2015 године.

Истраживачко искуство стицала је како у земљи тако и у иностранству. У периоду од 2001 године до данас завршила је велики број обука у иностраним Националним метролошким институтима као што су обуке из области механике флуида и запремине протока у Турском институту (UME-TUBITAK), обука из области неаутоматских вага у Грчком институту (EIM), обука из области претходно упакованих производа и густине у Енглеском заводу (NMO) National Measurement Office, обуку за мерење густине у Аустријском институту BEV као и у Аустријском заводу (Bundessamt fur

Eich und Vermessungswesen) обуку за метролошки надзор над мерилима и претходно упакованим производима.

Бранка Б. Раданов је технички оцењивач за стандард ISO/ IEC 17025, технички експерт у области масе и примене стандарда ISO/ IEC 17020, ангажован од Акредитационог Тела Србије, као и Института за акредитацију Републике Македоније, водећи оцењивач за серију стандарда ISO 9001 као и ISO 14001. Активни је члан и контакт особа за Републику Србију радне групе WELMEC WG 6 (Европска сарадња у законској метрологији) као и члан радне групе OIML TC 6 (Међународне организације за законску метрологију).

Објавила је више од 20 стручних радова од којих је један рад објављен на SCI листи као први аутор такође и 2 рада као један од аутора. Учествовала је у великом броју међународних и европских конференција као модератор и предавач (RMO-ИМЕКО TC 11, TAIEХ, International Conference on Legal Metrology, UASQ) као и на скуповима и конференцијама одржаним у земљи као што су ЈУПИТЕР, ЈУСК, Конгрес метролога и многи други.

У Дирекцији за мере и драгоцене метале запослена је на радном месту Шефа Одсека за контролу и надзор Београд, у Сектору за контролу и надзор. Решењем Владе Републике Србије 119-12664/2015 од 28. новембра 2015. године, мр Бранка Раданов је члан шире Радне групе за стручну редактуру превода правних тековина Европске Уније. Мр Бранка Раданов се служи програмским пакетима Microsoft Office (Word, Excel, Power Point), AutoCAD и MathCAD. Одлично се користи енглеским језиком, а поседује и основна знања из немачког језика.

ПРИЛОГ 1.

Изјава о ауторству

Потписана _____ мр Бранка Ј. Раданов, дипл.инж.маш.
број индекса _____

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

**ИСТРАЖИВАЊЕ РАДНИХ ПАРАМЕТАРА КОНТАКТНОГ КОНДЕНЗАТОРА –
ДЕГАЗАТОРА СА КОНТИНУАЛНИМ КОНТАКТОМ ФАЗА ЗА ПРИПРЕМУ ВОДЕ ЗА
СИСТЕМЕ ДАЉИНСКОГ ГРЕЈАЊА**

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

Потпис докторанда

У Београду, _____ август 2016. године

ПРИЛОГ 2.**Изјава о истоветности штампане и електронске верзије
докторског рада**Име и презиме аутора мр Бранка Ј. Раданов, дипл.инж.маш.

Број индекса _____

Студијски програм _____

Наслов рада **ИСТРАЖИВАЊЕ РАДНИХ ПАРАМЕТАРА КОНТАКТНОГ
КОНДЕНЗАТОРА – ДЕГАЗАТОРА СА КОНТИНУАЛНИМ КОНТАКТОМ ФАЗА ЗА
ПРИПРЕМУ ВОДЕ ЗА СИСТЕМЕ ДАЉИНСКОГ ГРЕЈАЊА**Ментор проф. др Бранислав ЈаћимовићПотписана мр Бранка Ј. Раданов, дипл.инж.маш.

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду.**

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања 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.

Потпис докторандаУ Београду, август 2016. године

Прилог 3.**Изјава о коришћењу**

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

ИСТРАЖИВАЊЕ РАДНИХ ПАРАМЕТАРА КОНТАКТНОГ КОНДЕНЗАТОРА – ДЕГАЗАТОРА СА КОНТИНУАЛНИМ КОНТАКТОМ ФАЗА ЗА ПРИПРЕМУ ВОДЕ ЗА СИСТЕМЕ ДАЉИНСКОГ ГРЕЈАЊА

која је моје ауторско дело.

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

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство

2. Ауторство - некомерцијално

3. Ауторство – некомерцијално – без прераде

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима

5. Ауторство – без прераде

6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

Потпис докторанда

У Београду, август 2016. године

1. Ауторство - Дозвољавање умножавања, 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. Дозвољавање умножавања, 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 прераде. Дозвољавање умножавања, 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. Дозвољавање умножавања, 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 прераде. Дозвољавање умножавања, 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. Дозвољавање умножавања, 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.