

Procjena pada tlaka pri dvofaznom strujanju

Rakarić, Mateja

Undergraduate thesis / Završni rad

2015

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Chemical Engineering and Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:149:942321>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-10**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Chemical Engineering and Technology University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Mateja Rakarić

PROCJENA PADA TLAKA PRI DVOFAZNOM STRUJANJU

ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada: izv. prof. dr. sc. Jasna Prlić Kardum

Članovi ispitnog povjerenstva: izv. prof. dr. sc. Jasna Prlić Kardum

izv. prof. dr. sc. Gordana Matijašić

izv. prof. dr. sc. Juraj Šipušić

Zagreb, srpanj 2015.

Zahvaljujem se Zavodu za mehaničko i toplinsko procesno inženjerstvo i prof. dr. sc. Antunu Glasnoviću, a posebno mentorici izv. prof. dr. sc. Jasni Prlić Kardum što mi je omogućila izradu završnog rada te na stručnoj pomoći tijekom izrade rada.

Veliko hvala mojoj obitelji koji su mi omogućili studij i prijateljima na podršci koju su mi pružali.

SAŽETAK

U radu su provedena istraživanja o postupcima izračunavanja pada tlaka trenjem kod horizontalnog dvofaznog strujanja za sistem zrak - voda u cijevi malog promjera. Kod primijenjenih protoka kapljevite odnosno plinske faze, opaženi su različiti pojavni oblici dvofaznog strujanja: čepoliko, valovito, mjehurasto i udarno strujanje, te različiti prijelazni oblici. Za procjenu pada tlaka trenjem kod horizontalnog dvofaznog strujanja primijenjen je postupak po Bakeru i Lockhart Martineliju.

Usporedbom eksperimentalnih i izračunatih vrijednosti pada tlaka ispitana je primjenjivost pojedinih modela. Na temelju rezultata izvedeni su zaključci o primjenjivosti i ograničenjima pojedinih postupaka za izračunavanje pada tlaka kod horizontalnog dvofaznog strujanja, u zadanim uvjetima rada.

SUMMARY

The research about methods for calculating pressure drop caused by friction in horizontal two - phase flow for air - water system in a small diameter tube was made. At applying flow of liquid and gas phases, respectively, different forms of two - phase flow were observed: plug, wavy, bubble and slug as well as various transitional forms. Bakers and Lockhart Martinelli procedures have been applied for estimating pressure drop of the two - phased flow. Applicability of the models was tested by comparing with values obtained experimentally. Based on these results, conclusions about usability and limitations of certain models for pressure calculations in horizontal two phase flow were made.

Sadržaj

1.0. UVOD	1
2.0. TEORIJSKI DIO	2
2.1. OSOBITOSTI DVOFAZNOG STRUJANJA	2
2.1.1. Oblici horizontalnog strujanja.....	2
2.1.2. Predviđanje oblika horizontalnog dvofaznog strujanja.....	4
2.2. PAD TLAKA KOD HORIZONTALNOG DVOFAZNOG STRUJANJA.....	6
2.3. KRITERIJI UTVRĐIVANJA PODRUČJA DVOFAZNOG STRUJANJA.....	7
2.4. POSTUPCI IZRAČUNAVANJA PADA TLAKA KOD HORIZONTALNOG DVOFAZNOG STRUJANJA	9
2.4.1. Lockhart Martinellijev postupak.....	11
2.4.2. Bakerov postupak.....	13
3.0. EKSPERIMENTALNI DIO	16
3.1. OPIS APARATURE.....	16
3.2. KARAKTERISTIKE MJERNOG SUSTAVA	17
3.3. PROVEDBA MJERENJA I OBRADA MJERNIH PODATAKA	17
4.0. REZULTATI.....	19
4.1. PODACI	19
5.0. RASPRAVA.....	26
6.0. ZAKLJUČAK	27
7.0. SIMBOLI	28
8.0. LITERATURA.....	29

1.0. UVOD

Proračuni pada tlaka za različite sustave, čest su problem u inženjerskoj praksi, a vrlo često se odnose na protjecanje višefaznih sustava. Rješenja mogu biti vrlo složena te uključuju čitav niz utjecaja koji se pri takvim protocima javljaju zahtijevajući postavljanje i rješavanje čitavog niza jednadžbi.

Dvofazni sustav plinovito – kapljevito smatra se izuzetno složenim zbog pojave deformacija na granici faza te kompresibilnosti jedne faze. Upravo stoga, pad tlaka do kojeg dolazi zbog trenja pri horizontalnom dvofaznom strujanju ne može se egzaktno opisati, već se razmatra empirijskim postavkama u obliku različitih karakterističnih značajki, koje obuhvaćaju utjecaj mjerodavnih veličina na pad tlaka trenjem.

Dvofazno strujanje plinsko - kapljevinskih smjesa istraživali su mnogi znanstvenici koji su polazeći od empirijskih postavki, iz praktičnih razloga uvodili različita ograničenja i pojednostavljenja, s ciljem dobivanja što jednostavnijeg, a istodobno dovoljno točnog postupka za proračun pada tlaka trenjem horizontalnog dvofaznog strujanja.

Namjera ovog rada je ukazati na osobitosti različitih oblika dvofaznog strujanja, opisati postupke kojima je moguće što praktičnije i točnije procijeniti pad tlaka trenjem kod dvofaznog strujanja, i međusobno usporediti prikazane postupke. Na taj način će se pokušati definirati područja u kojima je moguća primjena pojedinih postupaka i ograničenja njihove primjene u provedenim uvjetima rada.

2.0. TEORIJSKI DIO

2.1. OSOBITOSTI DVOFAZNOG STRUJANJA

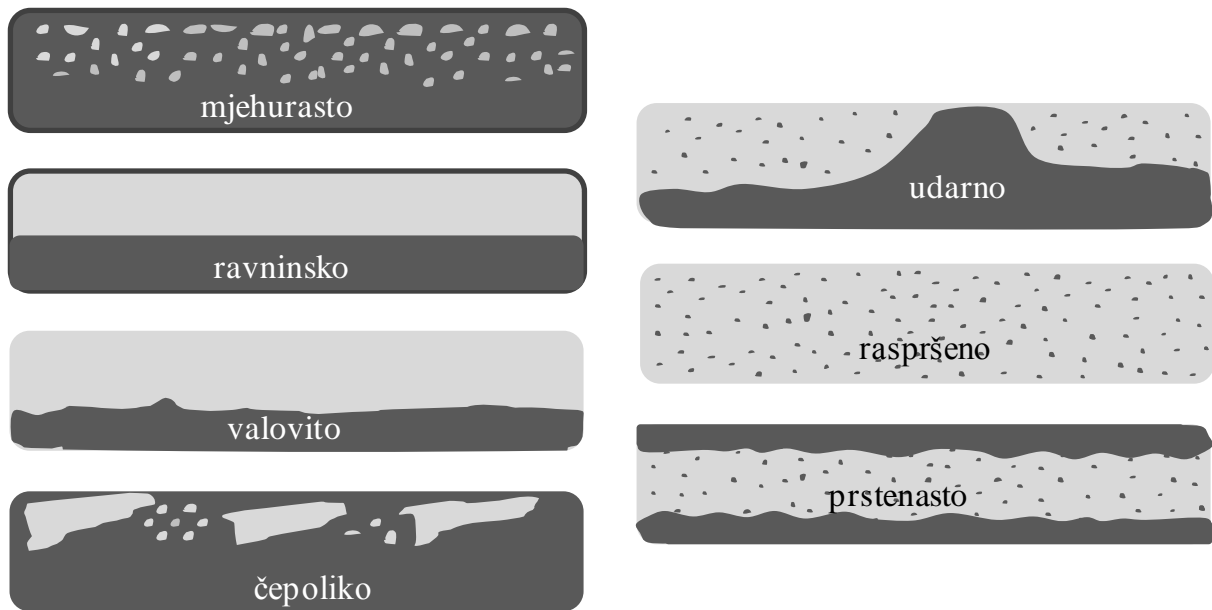
Pojavom plinovite faze u struji kapljevine znatno se mijenjaju svojstva prvobitnog jednofaznog strujanja. Zbivanja unutar dvofaznog strujanja vrlo su kompleksna i predstavljaju splet međudjelovanja pripadnih veličina i sila. Opisivanje dvofaznih strujanja temelji se na činjenici da plinovita faza struji brže od kapljevite faze.

Nejednakost u količinama faza koje se zadrže po presjeku cijevi i količinama koje struje kroz presjek javlja se kao posljedica razlike u brzinama strujanja između faza. Površina između faza poprima različite oblike povećanjem protoka plinske faze.

Kod horizontalnog dvofaznog strujanja plinsko - kapljeviti smjesa, pokazalo se da je pad tlaka uslijed trenja veći od pada tlaka samo jedne faze, a veći je i od pada tlaka izračunatog s prosječnim fizičkim svojstvima smjese kapljevina - plin. Prilikom protjecanja dvije faze kroz istu cijev, plinska faza većinom protječe brže od kapljevite. Zbog toga se za različite omjere protoka plina i kapljevine uspostavljaju različiti oblici horizontalnog dvofaznog strujanja, koji za posljedicu imaju i različite padove tlaka.

2.1.1. Oblici horizontalnog strujanja

Prve bitne pokušaje definiranja granica pojava područja horizontalnog dvofaznog strujanja u cijevima učinili su 1949. godine Bergelin, Gazley i Kosterin. Vizualnim opažanjem Alves je prvi istražio i opisao moguće pojavne oblike horizontalnog dvofaznog strujanja. Uočio je i opisao sedam pojava oblika strujanja s obzirom na povećanje brzine strujanja plinske faze prikazanih na Slici 1.



Slika 1. Oblici dvofaznog strujanja u horizontalnim cijevima po Alvesu

- *mješurasto strujanje*: pojavljuje se kada je volumni udio plinovite faze znatno manji od volumnog udjela kapljevite faze; mjehurići plina ili pare struje raspršeni uz gornju stjenku cijevi
- *ravninsko ili slojevito strujanje* : ostvaruje se pri malim brzinama obje faze; svaka faza struji svojim dijelom presjeka cijevi, odijeljena od druge glatkom međufaznom površinom
- *valovito strujanje* : povećanjem brzine strujanja plinske faze uzburkava se površina kapljevine dolazi do razdvajanja slojev faza, kapljevina se valovito giba u smjeru strujanja
- *čepoliko ili klipasto strujanje* : smanjenje brzine kapljevite faze te povećanjem brzine strujanja plinovite iz mješurastog se prelazi u čepoliki oblik strujanja, dolazi do stapanja mjehurića plina, stvaraju se izduljeni klipasti oblici koji struje uz gornju stjenku
- *udarno ili bregasto strujanje*: plinovita faza koja struji brže od kapljevite zahvaća bregove valova koji se uzdižu toliko da čine zapreku struji plina i kreću se kroz cijev brzinom većom od srednje brzine kapljevine
- *prstenasto ili anularno*: kapljevina struji uz stjenke cijevi stvarajući prsten unutar kojeg struji plin,

- *kapljičasto ili raspršeno strujanje*: plin struji cijelim presjekom cijevi zajedno s finim kapljicama gotovo potpuno raspršene kapljevine, ovakav oblik se postiže zbog velikog udjela i protoka plinske faze.

2.1.2. Predviđanje oblika horizontalnog dvofaznog strujanja

Poznavanje oblika dvofaznog strujanja ima veliki značaj za izbor najprikladnije metode proračunavanja. Predloženo je nekoliko dvodimenzionalnih dijagrama empirijskog porijekla koji su temeljeni na ograničenom broju eksperimentalnih podataka.

Na osnovu podataka ranijih istraživača, Baker je predložio dijagram za predviđanje dvofaznog strujanja u horizontalnim cijevima koji danas ima najširu primjenu, prikazan na Slici 2.

Granice područja pojedinih oblika prikazuju se kao funkcije masene brzine plinovite faze i omjera masenih brzina kapljevite i plinovite faze:

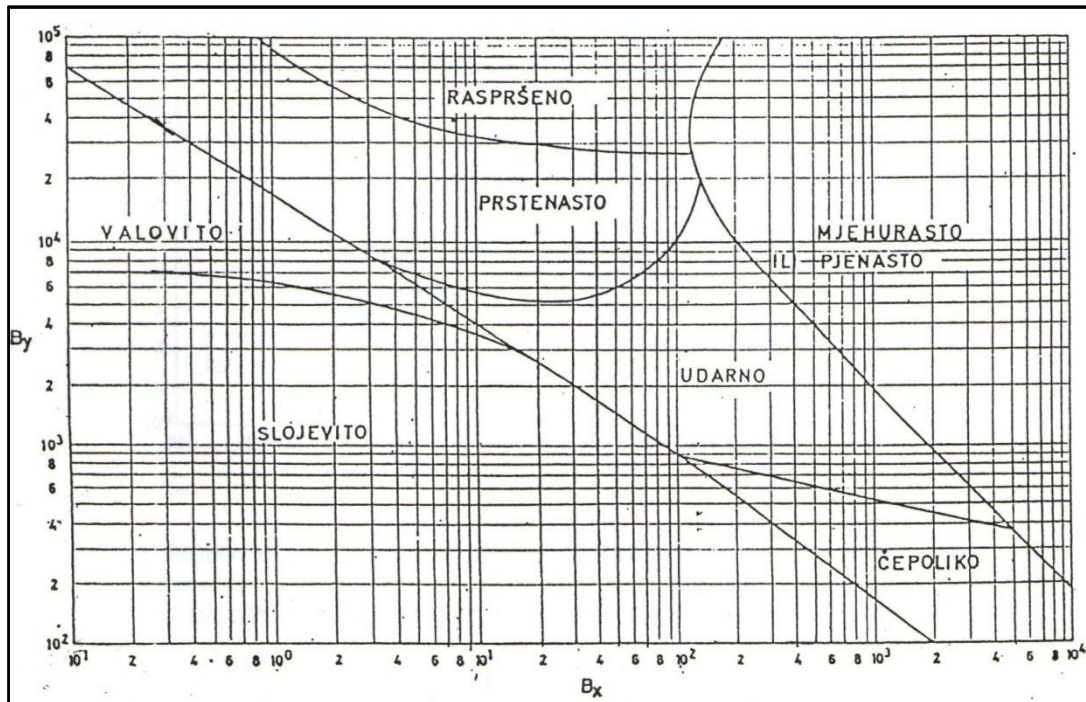
$$B_x = \left(\frac{m_{A,L}}{m_{A,G}} \right) \cdot \frac{\sqrt{\sigma_G \cdot \sigma_L}}{\sigma_L^{2/3}} \cdot \frac{\eta_L^{1/3}}{\sigma_L} \quad (1)$$

$$B_y = 7.09 \cdot \frac{m_{A,G}}{\sqrt{\sigma_G \cdot \sigma_L}} \quad (2)$$

Bakerov dijagram temelji se na podacima za sistem zrak - voda pri normalnim uvjetima, a za primjenu na ostale sisteme i uvjete različite od normalnih dodani su korekcijski faktori, izraženi kao parametar gustoće λ i parametar viskoznosti i površinske napetosti ψ :

$$\lambda = \left[\left(\frac{\rho_G}{1.2} \right) \left(\frac{1}{1000} \right) \right]^{1/2} \quad (3)$$

$$\psi = \frac{0.073}{\sigma_L} \left[\frac{\eta_L}{0.001} \left(\frac{1000}{\rho_L} \right)^2 \right]^{1/3} \quad (4)$$



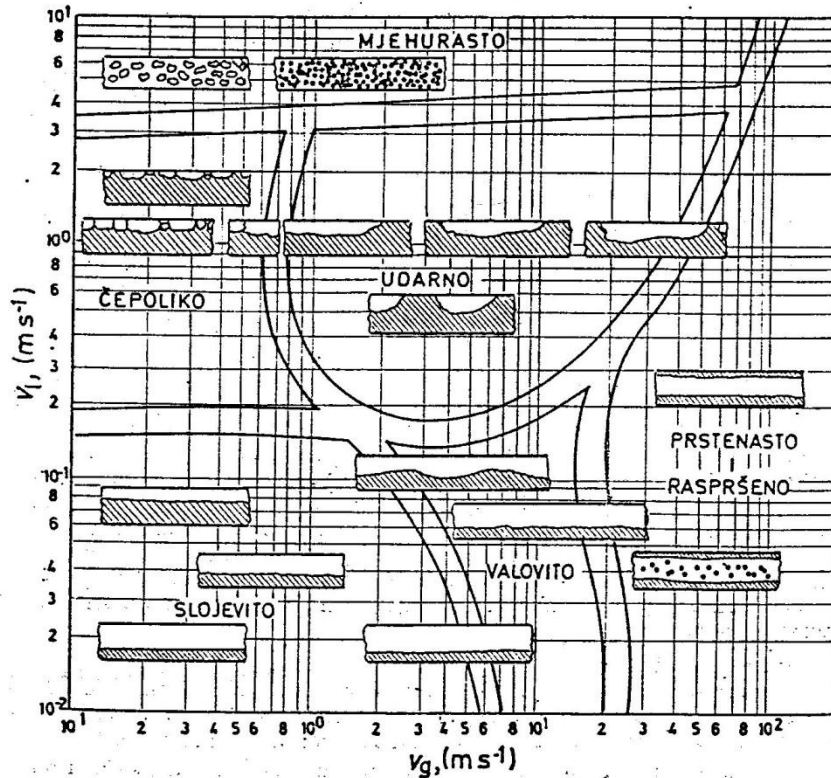
Slika 2. Bakerov dijagram za određivanje oblika dvofaznog horizontalnog strujanja

Granice među područjima u stvarnosti nisu izražene toliko jasno kao na dijagramu, već postoje prijelazna područja. Neslaganje Bakerovog dijagrama s radovima nekih istraživača posljedica su nepouzdanog vizualnog opažanja i nedostatka dvodimenzionalnog prikazivanja, posebno za predviđanje oblika dvofaznog strujanja u horizontalnim cijevima kod velikog promjera.

Slika 3. prikazuje područja pojedinih oblika horizontalnog dvofaznog strujanja kao funkciju jednofaznih brzina strujanja plinovite i kapljevite faze.

Ucrtane granične linije predstavljaju Manhdaneov dijagram, koji se s obzirom na eksperimentalnu potkrijepljenost može smatrati najpouzdanijim kriterijem određivanja oblika dvofaznog strujanja.

Pri upotrebi ovog dijagrama treba imati na umu da su granice prijelaza iz jednog oblika u drugi dosta široke.



Slika 3. Mandhaneov dijagram za određivanje oblika horizontalnog dvofaznog strujanja

2.2. PAD TLAKA KOD HORIZONTALNOG DVOFAZNOG STRUJANJA

Pad tlaka pri dvofaznom strujanju u horizontalnim cijevima zbroj je triju komponenti: statičkog pada tlaka, pada tlaka uslijed ubrzanja i pada tlaka uslijed trenja:

$$\left(\frac{\Delta p}{l}\right)_{DS} = \left(\frac{\Delta p}{l}\right)_s + \left(\frac{\Delta p}{l}\right)_a + \left(\frac{\Delta p}{l}\right)_f \quad (5)$$

Statički pad tlaka definiran je izrazom :

$$\left(\frac{\Delta p}{l}\right)_s = \bar{\rho} g \sin \varphi \quad (6)$$

gdje je $\bar{\rho}$ srednja gustoća smjese plinovite i kapljevite faze, izrežena kao:

$$\bar{\rho} = \rho_G \phi + \rho_L (1 - \phi) \quad (7)$$

ϕ predstavlja volumni udio plinovite faze po presjeku cijevi, a definira se prema izrazu:

$$\phi = \frac{v_G}{v_G + v_L} = \frac{A_G}{A} \quad (8)$$

U slučaju horizontalnog dvofaznog strujanja statička komponenta pada tlaka jednaka je nuli. Ako je riječ o istodobnom prijenosu topline, promjene impulsa između dva presjeka cijevi posljedica je ekspanzije plinovite faze do koje dolazi padom tlaka po dužini cijevi ili povećanja količine plinovite faze isparavanjem kapljevine. Da bi se točno izračunala promjena impulsa, nužno je poznavati profil brzina strujanja i raspodjele faza po presjeku cijevi.

Kod adijabatskih dvofaznih strujanja pad tlaka svodi se samo na komponentu gubitka tlaka uslijed trenja. Pad tlaka trenjem funkcija je više veličina: gustoće, viskoznosti, udjela pojedine faze, masenog protoka, duljine i promjera cijevi, hrapavosti stjenke cijevi i površinske napetosti: $\Delta p = f(m, x, d, l, \rho_G, \rho_L, \eta_G, \eta_L, \sigma, k)$.

Budući da se računski nije uspjelo jednoznačno opisati sve utjecaje na pad tlaka, razlikuju se dva pristupa za rješavanje tog problema:

- empirijskim jednadžbama koje se temelje na eksperimentalnim podacima,
- teorijskim modelima gdje se složeni mehanizmi dvofaznog strujanja opisuju pojednostavljenim fizičkim predodžbama na koje se mogu primijeniti zakonitosti dvofaznog strujanja.

Pri tome se razlikuju dva modela:

- homogeni model kod kojeg se pretpostavlja da su brzine strujanja faza jednake, tako da se strujanje promatra kao jednofazno strujanje, a pad tlaka određuje se iz srednjih vrijednosti fizikalnih svojstva sustava (gustoća, viskoznost)
- heterogeni model kod kojeg se pretpostavlja potpuno odvojeno strujanje faza različitih brzina strujanja i fizikalnih svojstava, što se promatra kao dva paralelno odvojena jednofazna strujanja sa ili bez međusobnog djelovanja.

2.3. KRITERIJI UTVRĐIVANJA PODRUČJA DVOFAZNOG STRUJANJA

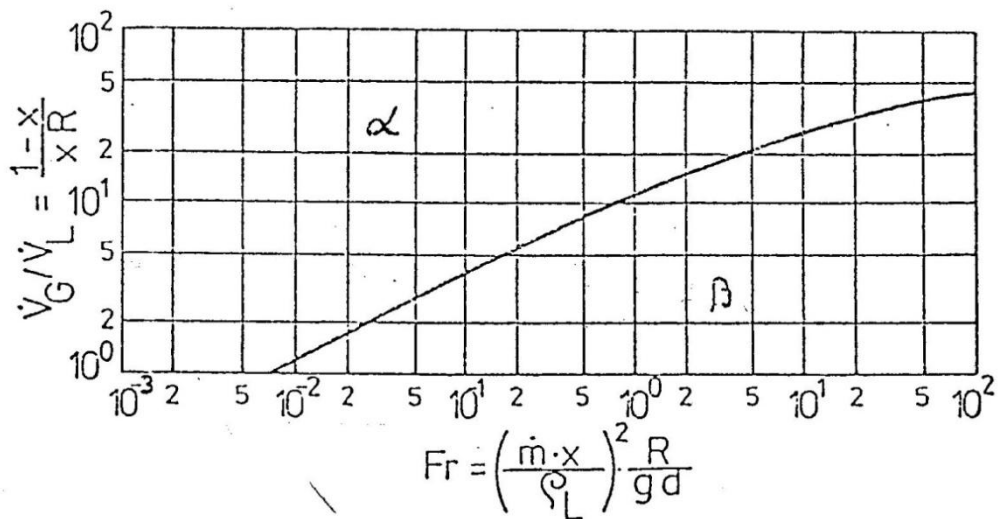
Pad tlaka trenjem slijedi zakonitosti koje se mogu klasificirati tako da obuhvaćaju, po hidrodinamičkim svojstvima, slične oblike horizontalnog dvofaznog strujanja. Po Mousalliju se razlikuju dva područja dvofaznog strujanja gdje pad tlaka trenjem slijedi posve različite zakonitosti :

- β - područje, u kojem su brzine strujanja plinovite i kapljevite faze približno jednake, s kapljevitom kao kontinuirano raspodijeljenom fazom po presjeku cijevi

- α - područje, u kojem su brzine strujanja plinske i kapljevite faze izrazito različite, s plinskom fazom kao pokretačkom fazom, pa je za pad tlaka značajna izmjena količine gibanja na granici faza

β - područje obuhvaća čepolike i mjehuraste oblike strujanja, a α - područje obuhvaća valovito, udarno i prstenasto strujanje. Slojevito i raspršeno strujanje razmatraju se kao posebni slučajevi horizontalnog dvofaznog strujanja.

Za utvrđivanje područja strujanja kao kriterij može se upotrijebiti granična krivulja Moussalija prikazana na Slici 4.



Slika 4. Granična krivula po Moussaliju

Kriterij za prijelaz iz jednog područja u drugo, osim pomoću granične krivulje Moussalija, može se postaviti i matematičkim izrazima. Ako je:

$$\frac{v_G}{v_L} = \frac{xR}{1-x} = \frac{1}{\beta} \leq \frac{\sqrt[12]{Fr_m}}{1 + \frac{\sqrt{Fr_m}}{7}} \quad (9)$$

onda je strujanje u β - području.

Za α - područje vrijedi:

$$\frac{1}{\beta} > \frac{\sqrt[12]{Fr_m}}{1 + \frac{\sqrt{Fr_m}}{7}} \quad (10)$$

Fr_m predstavlja modificiranu Froudeovu značajku, a definira se izrazom:

$$Fr_m = \left(\frac{\dot{m}_A \cdot x}{\rho_L} \right)^2 \cdot \frac{R}{g \cdot d} \quad (11)$$

gdje je x maseni udio plinovite faze definiran pomoću površinske masene brzine (maseni fluks):

$$x = \frac{\dot{m}_G}{\dot{m}_L + \dot{m}_G} \quad (12)$$

2.4. POSTUPCI IZRAČUNAVANJA PADA TLAKA KOD HORIZONTALNOG DVOFAZNOG STRUJANJA

Svaki pristup opisu pada tlaka dvofaznog strujanja temelji se na pretpostavci da je raspodjela tlaka po presjeku cijevi ravnomjerna, tako da se iznalaženjem zakonitosti pada tlaka jedne faze definira pad tlaka promatranog dvofaznog strujanja.

Temeljna jednadžba koja se koristi za izračunavanje pada tlaka jednofaznog strujanja je Darcy - Weisbachova jednadžba :

$$\Delta p = \xi \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2 \cdot \rho}{2} = \xi \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\dot{m}^2}{2\rho} \quad (13)$$

Kod dvofaznog strujanja jednadžba za pad tlaka za plinsku fazu glasi :

$$\left(\frac{\Delta p}{l} \right)_G = \xi_G \cdot \frac{\dot{m}_G^2}{2\rho_G \cdot d} \quad (14)$$

gdje se ξ_G može izračunati iz Blaussiusovog izraza za faktor trenja glatkih cijevi (izraz vrijedi do $Re < 10^5$):

$$\xi_G = \frac{0.3164}{Re_G} \quad (15)$$

Gustoća masenog toka plinovite faze po ukupnom presjeku cijevi računa se iz izraza :

$$\dot{m}_{AG} = v_G \cdot \rho_G \quad (16)$$

Pad tlaka po jedinici duljine za kapljevitu fazu dobiva se izrazom :

$$\left(\frac{\Delta p}{l} \right)_L = \xi_L \cdot \frac{\dot{m}_L^2}{2\rho_L \cdot d} \quad (17)$$

ξ_L predstavlja faktor trenja i ovisi o hrapavosti stjenke i režimu strujanja. Gustoća masenog toka kapljevine po ukupnom presjeku cijevi računa se iz jednadžbe :

$$\dot{m}_{AL} = v_L \cdot \rho_L \quad (18)$$

Vrsta strujanja definirana je Reynoldsovim brojem i predstavlja bezdimenzijsku značajku, a definira se izrazom :

$$\text{Re} = \frac{v \cdot d \cdot \rho}{\eta} = \frac{\dot{m} \cdot d}{\eta} \quad (19)$$

Za plinsku fazu kod dvofaznog strujanja Reynoldsov broj računa se prema:

$$\text{Re}_G = \frac{\dot{m}_{AG} \cdot d}{\eta_G} \quad (20)$$

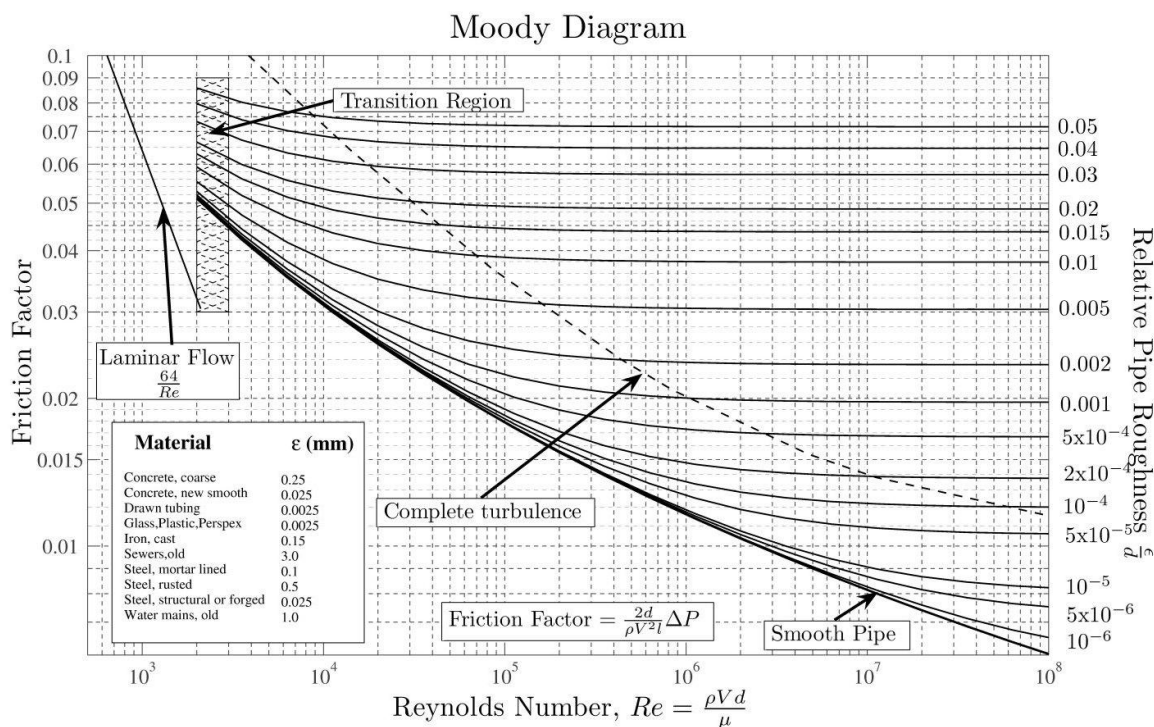
a za kapljevitu fazu prema :

$$\text{Re}_L = \frac{\dot{m}_{AL} \cdot d}{\eta_L} \quad (21)$$

Kada je $\text{Re}_L < 1000$, prisutno je laminarno strujanje i faktor trenja, ξ_L dobijemo izrazom :

$$\xi_L = \frac{64}{\text{Re}_L} \quad (22)$$

Ako je $\text{Re}_L > 1000$, prisutno je prijelazno i turbulentno strujanje, pa se faktor trenja može odrediti iz Moodyjevog dijagrama (Slika 5.) kao funkciju Reynoldsovog broja i hrapavosti stjenke cijevi.



Slika 5. Moodyjev dijagram

Za hidraulički glatke cijevi za cijelo područje turbulentnog strujanja, faktor trenja se može izračunati iz Colebrookove aproksimacije:

$$\xi_L = \left[1.81 \cdot \log \left(\frac{Re_L}{7} \right) \right]^{-2} \quad (23)$$

Ispitivanja su pokazala da je ukupni pad tlaka dvofaznog strujanja veći od sume pada tlaka kapljevite i pada tlaka plinske faze. Glavni uzrok tome je što osim tlaka uzrokovanog trenjem sa stjenkom cijevi imamo i pad tlaka uzrokovan gubitkom energije na formiranje međufazne površine.

2.4.1. Lockhart Martinellijev postupak

Osnovne pretpostavke koje su izveli Lockhart i Martinelli za pad tlaka uz istovremeno strujanje kapljevine i plina u horizontalnoj cijevi su:

- pad tlaka za kapljevitu fazu mora biti jednak padu tlaka za plinsku fazu, bez obzira na oblik strujanja
- ukupni volumen cijevi je u svakom trenutku jednak zbroju volumena plinovite i kapljevite faze.

Pretpostavlja se da je pad tlaka dvofaznog strujanja proporcionalan padu tlaka jednofaznog strujanja, po cijelom presjeku cijevi, plinovite ili kapljevite faze.

Kod dvokomponentnog strujanja postoje četiri režima strujanja, koji mogu postojati za vrijeme istovremenog strujanja kapljevine i plina ili pare.

- 1) Strujanje obje faze može biti turbulentno.
- 2) Strujanje kapljevine može biti laminarno, a strujanje plinske faze turbulentno.
- 3) Strujanje plinske faze može biti laminarno, a strujanje kapljevine turbulentno.
- 4) Strujanje obje faze može biti laminarno.

Osnovna jednadžba za izračunavanje pada tlaka horizontalnog dvofaznog strujanja koju su izveli Lockhart i Martinelli glasi :

$$\left(\frac{\Delta p}{l}\right)_{DS} = \Phi_G^2 \cdot \left(\frac{\Delta p}{l}\right)_G = \Phi_L^2 \cdot \left(\frac{\Delta p}{l}\right)_L \quad (24)$$

Pad tlaka plinovite i kapljevite faze računa se preko jednadžbi (14) i (17). Φ_G i Φ_L predstavljaju korekcijske faktore za plinsku i kapljevitu fazu, a funkcija su bezdimenzijske značajke X . Računaju iz jednadžbi:

$$\Phi_G^2 = 1 + CX + X^2 \quad (25)$$

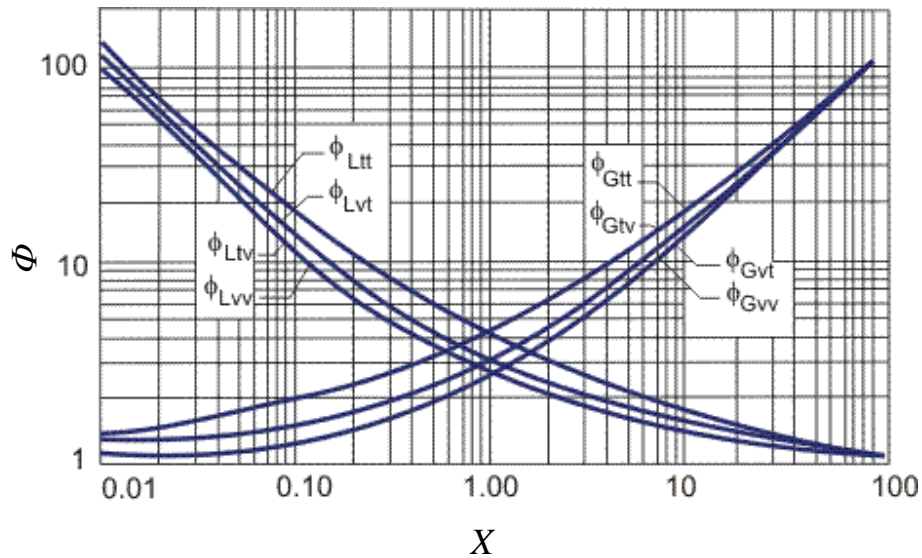
$$\Phi_L^2 = 1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2} \quad (26)$$

Gdje je C , konstanta odabrana ovisno o režimu strujanja (tablica 1).

Tablica 1. Konstante za određivanje Lokart Martinelijeve značajke, X za različite režime strujanja.

vrsta strujanja (L-G)	C
turbulentno - turbulentno	20
laminarno - turbulentno	12
turbulentno - laminarno	10
laminarno - laminarno	5

Funkcionalna ovisnost korekcijskog faktora Φ o bezdimenzijskoj značajci X data je dijagramom na slici 6. za sva prethodno nabrojana četiri moguća tipa mehanizma strujanja.



Slika 6. Dijagram za određivanje korekcijskog faktora Φ prema Lockhartu i Martinelliju

Na temelju eksperimentalnih podataka došlo se do izraza za bezdimenzijsku značajku X koji vrijedi u slučaju laminarno - laminarno i laminarno - turbulentno strujanje

$$X = \left[\left(\frac{\Delta p}{l} \right)_L / \left(\frac{\Delta p}{l} \right)_G \right]^{0.5} \quad (27)$$

ili jednadžbom:

$$X^2 = \left(\frac{m_{AL}}{m_{AG}} \right)^2 \cdot \frac{\rho_G \cdot \xi_L}{\rho_L \cdot \xi_G} \quad (28)$$

U slučaju da obje faze struje turbulentno bezdimenzijsku značajku X određujemo:

$$X = \left(\frac{m_{AL}}{m_{AG}} \right)^{0.9} \cdot \left(\frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^{0.5} \cdot \left(\frac{\eta_L}{\eta_G} \right)^{0.1} \quad (29)$$

Ovaj postupak zahvaljujući svojoj jednostavnosti i sveobuhvatnosti nalazi široku primjenu u praksi, iako su neki istraživači ukazali na njegove nedostatke.

2.4.2. Bakerov postupak

Ovaj postupak se temelji na dijagramu za predviđanje dvofaznog strujanja koji je prikazan na Slici 2. Koordinate Bakerovog dijagrama date su slijedećim izrazima:

$$B_x = \frac{m_{AL}}{m_{AG}} \cdot \lambda \psi \quad (30)$$

$$B_y = \frac{m_G}{\lambda} \quad (31)$$

Pad tlaka uslijed trenja računa se iz jednadžbe:

$$\left(\frac{\Delta p}{l}\right)_{DS} = \Phi^2 \cdot \left(\frac{\Delta p}{l}\right)_G \quad (32)$$

Pad tlaka računat uz pretpostavku da samo plinovita faza protječe kroz cijev računa se iz jednadžbe (14). Φ je Bakerov pokazatelj za dvofazno strujanje i računa se različito za svaki oblik dvofaznog strujanja, i to na slijedeći način:

- za mjehurasto strujanje

$$\Phi = 16.64 \cdot \frac{X^{0.75}}{m_L^{0.1}} \quad (33)$$

- za čepoliko strujanje

$$\Phi = 35.76 \cdot \frac{X^{0.855}}{m_L^{0.17}} \quad (34)$$

- za slojevito strujanje

$$\Phi = 4331 \cdot \frac{X}{m_L^{0.8}} \quad (35)$$

- za udarno strujanje

$$\Phi = 2628.8 \cdot \frac{X^{0.815}}{m_L^{0.5}} \quad (36)$$

- za prstenasto strujanje

$$\Phi = (4.8 - 0.0123) \cdot d \cdot X^{(0.343 - 0.00083d)} \quad (37)$$

gdje je X Lockhart - Martinellijeva značajka koja se računa jednadžbom:

$$X = \left[\left(\frac{\Delta p}{l} \right)_L / \left(\frac{\Delta p}{l} \right)_G \right]^{0.5} \quad (38)$$

ili jednadžbom:

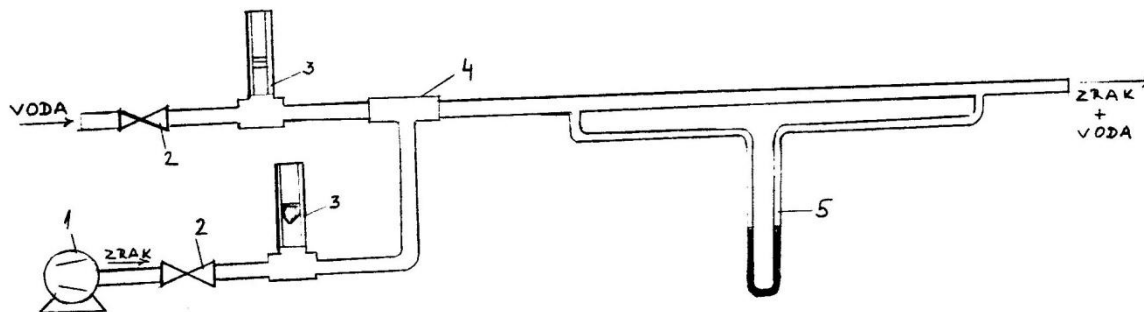
$$X^2 = \left(\frac{m_{AL}}{m_{AG}} \right)^2 \cdot \frac{\rho_G \cdot \xi_L}{\rho_L \cdot \xi_G} \quad (39)$$

Gustoća masenog toka kapljevite faze daje se u $\text{kgm}^{-2}\text{h}^{-1}$. Ovaj postupak se preporučuje za preliminarne proračune kod dimenzioniranja cjevovoda za dvofazno strujanje.

3.0. EKSPERIMENTALNI DIO

3.1. OPIS APARATURE

Mjerenje je provedeno na aparaturi shematski prikazanoj na slici 8.



Slika 8. Shematski prikaz aparature za mjerenje pada tlaka :

- 1 - kompresor, 2 - redukcijski ventil, 3 - rotametri,
- 4 - komora za miješanje, 5 - U-manometar

Mjerenje se provodilo u sustavu zrak - voda. Mjerali su se protoci zraka i vode te pad tlaka, a vizualnim opažanjima utvrđen je oblik strujanja za sva provedena mjerenja. Opažanja su uspoređena s predviđanjima na temelju Bakerovog (Slika 2.) odnosno Mandhenovog dijagrama (Slika 3.).

Voda se dovodila do komore za miješanje gdje se miješala sa zrakom čiji je dotok osiguran kompresorom. Komora za miješanje izvedena je tako da kapljevina koja se raspodjeljuje u obliku prstena dolazi u dodir sa zrakom. Protoci zraka i vode mjereni su rotametrima, a regulirani su pomoću redukcijskog ventila.

Mjerna linija, duga 3.5 metra, smještena je dovoljno daleko od komore za miješanje (80 d) čime je isključena mogućnost naletnog i izlaznog djelovanja strujanja na pad tlaka trenjem u mjernoj liniji.

Pad tlaka mjereno je diferencijalnim U - manometrom, a kao manometarska kapljevina korištena je otopina joda u tetraklormetanu zbog karakteristične ljubičaste boje i zbog netopivosti joda i tetraklormetana u vodi.

3.2. KARAKTERISTIKE MJERNOG SUSTAVA

$$l = 3.5 \text{ m}$$

$$d = 0.0125 \text{ m}$$

$$\sigma = 0.073 \text{ N/m}$$

$$\eta_G = 1.8064 \cdot 10^{-2} \text{ mPas}$$

$$\eta_L = 1.088 \text{ mPas}$$

$$\rho_G = 0.998 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_L = 998.6 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{MK} = 1530 \text{ kg/m}^3$$

3.3. PROVEDBA MJERENJA I OBRADA MJERNIH PODATAKA

Na temelju Bakerovog dijagrama (Slika 2) određeni su volumni protoci zraka i vode u svrhu predviđanja određenog oblika strujanja. Pri tome su za pojedine protoke utvrđivani oblici strujanja vizualnim opažanjem. Iz određenih volumnih protoka izračunate su koordinate Bakerovog dijagrama i određeni oblici strujanja prema jednadžbama (1) i (2).

Na temelju dobivenih vrijednosti za B_x i B_y određen je oblik strujanja. Mjerenje se provodilo tako da se za određene protoke zraka i vode očitavala odgovarajuća razlika u visini stupca manometarske kapljevine uz bilježenje pojavnih oblika strujanja, uočenih vizualnim opažanjem.

Iz dobivenih podataka za protok vode i zraka i visine stupca manometarske kapljevine izračunavao se pad tlaka za određene protoke zraka i vode pomoću izraza:

$$\left(\frac{\Delta p}{l} \right)_{\text{exp}} = \frac{\Delta h(\rho_{MT} - \rho_L)g}{l} \quad (40)$$

Na temelju Manhdaneovog dijagrama (Slika 3) i određenih volumnih protoka zraka i vode izračunate su srednje brzine strujanja zraka i vode koji su ujedno i koordinate Manhdaneovog dijagrama (Slika 3).

Za Lockhart Martinellijev postupak iz eksperimentalnih podataka o protocima vode i zraka izračunate su gustoće masenog toka pojedinih faza jednadžbama (16) i (18). Na temelju Reynoldsovih značajki jednofaznih strujanja (jednadžbe (20) i (21)), definirani su režimi strujanja, te su određeni koeficijenti trenja jednofaznog strujanja izrazima (15) i (22). Nakon toga su iz jednadžbe (27) određene vrijednosti značajke X . Funkcije Φ_G i Φ_L izračunate su izrazima (25) i (26). Primjenom jednadžbe (32) izračunati su padovi tlaka dvofaznog strujanja.

Srednje brzine strujanja zraka i vode računati su po ovim izrazima:

$$v_G = \frac{\dot{V}_G}{A} \quad (41)$$

$$v_L = \frac{\dot{V}_L}{A} \quad (42)$$

$$A = \frac{d^2 \cdot \pi}{4} \quad (43)$$

4.0. REZULTATI

4.1. PODACI

$$T_{\text{H}_2\text{O}} = 16^\circ\text{C}$$

$$\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 998,97 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{\text{L}} = 998,6 \text{ kg/m}^3$$

$$d = 0,0125 \text{ m}$$

$$\sigma_{\text{L}} = 0,073 \text{ N/m}$$

$$\eta_{\text{L}} = 1,088 \text{ mPas}$$

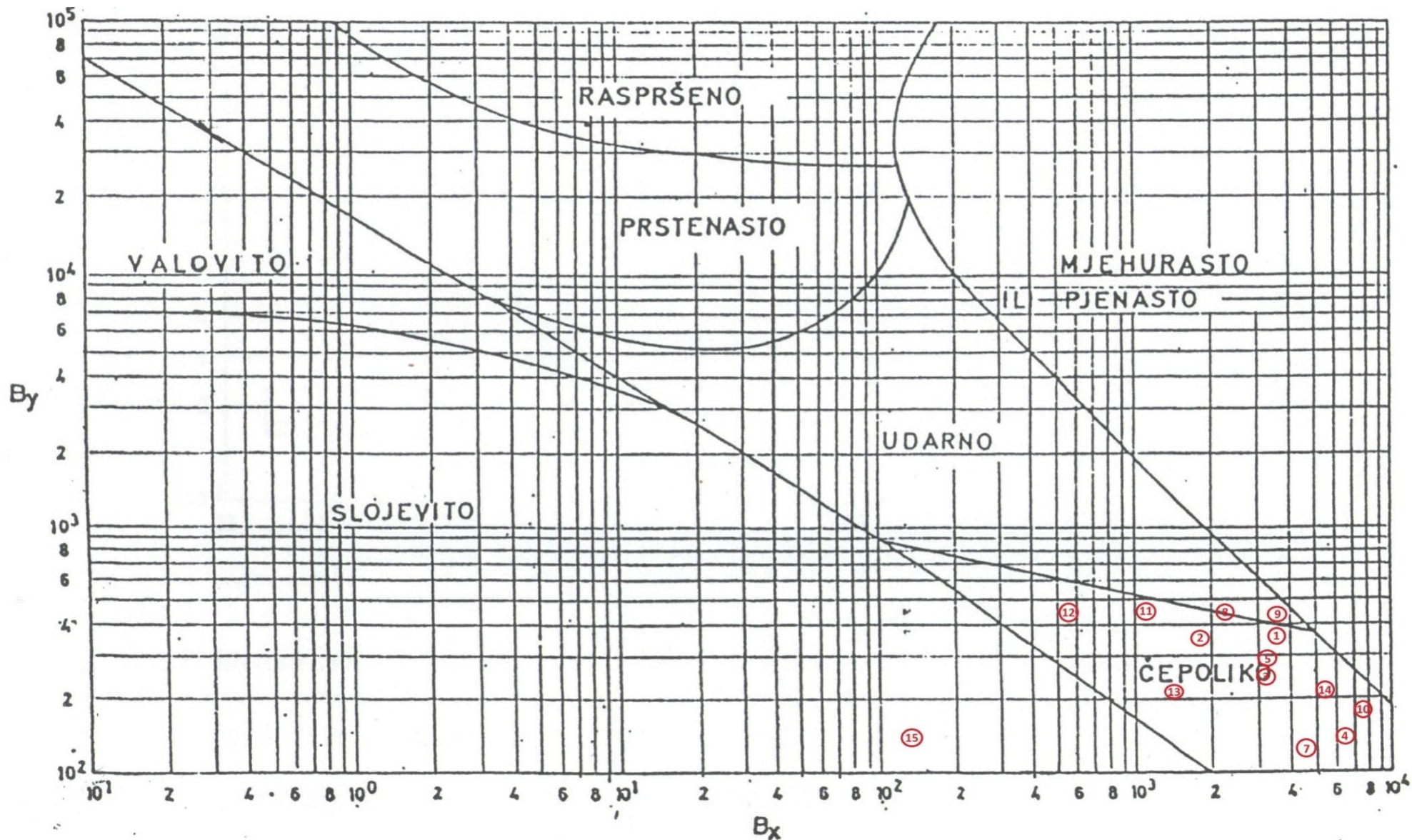
$$T_{\text{zrak}} = 22^\circ\text{C}$$

$$\rho_{\text{G}} = 0,998 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{\text{MT}} = 1530 \text{ kg/m}^3$$

Tablica 2. Izračunati podaci za usporedbu po Bakerovom dijagramu

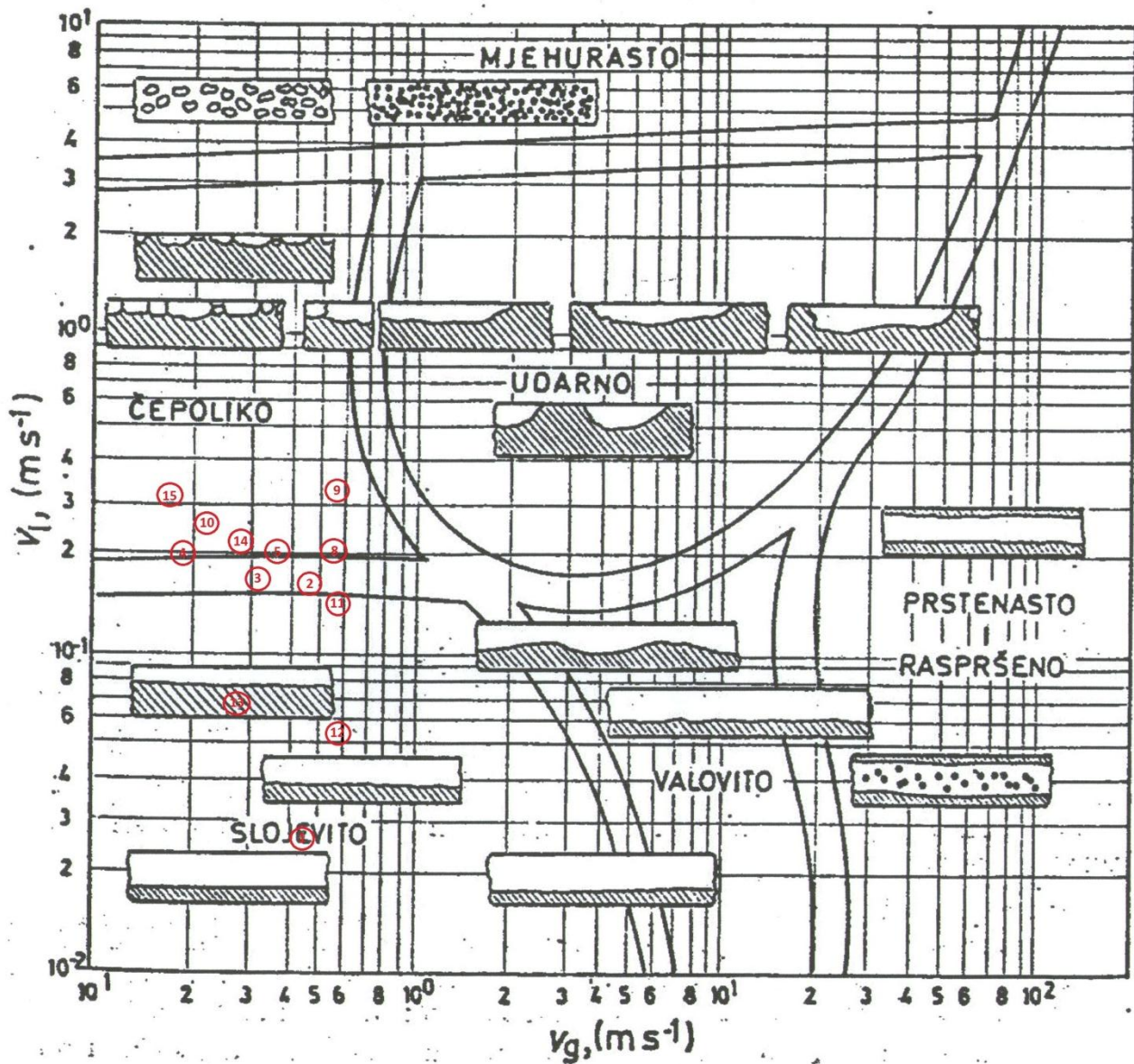
broj mjerjenja	\dot{V}_G (L/h)	\dot{V}_L (L/min)	Δh (mm)	B_x	B_y	vizualno opažanje	po Bakerovom dijagramu
1	200	0,2	12	3713,9	365,3	slojevito- čepoliko	čepoliko
2	200	1	140	1855,0	365,3	čepoliko	čepoliko
3	140	1,2	165	3182,2	255,7	čepoliko	čepoliko
4	80	1,4	180	6500,0	146,1	čepoliko- mjehurasto	čepoliko
5	160	1,4	230	3250,0	292,3	čepoliko- mjehurasto	čepoliko
6	40	1,8	193	16708,9	73,1	mjehurasto	mjehurasto
7	40	0,5	30	4638,2	73,1	valovito- čepoliko	čepoliko
8	250	1,5	290	2226,0	456,7	čepoliko- udarno	udarno
9	250	2,5	550	3710,0	456,7	udarno	udarno
10	100	2,0	350	7427,4	182,7	čepoliko	čepoliko
11	260	0,8	146	1143,3	475	čepoliko- udarno	čepoliko
12	260	0,4	61	570,2	475	udarno	čepoliko
13	120	0,5	44	1546,0	219,2	slojevito- čepoliko	čepoliko
14	120	1,7	298	5258,7	219,2	mjehurasto- čepoliko	čepoliko
15	60	2,3	362	142,0	109,6	mjehurasto- čepoliko	slojevito



Slika 9. Ucertani podaci za usporedbu po Bakerovom dijagramu

Tablica 3. Izračunati podaci za usporedbu po Manhdaneovom dijagramu

broj mjerjenja	\dot{V}_G (L/h)	\dot{V}_L (L/min)	v_G /(m/s)	v_L /(m/s)	vizualno opažanje	strujanje
1	200	0,2	0,453	0,0272	slojevito- čepoliko	slojevito
2	200	1	0,453	0,136	čepoliko	granica čepoliko- slojevito
3	140	1,2	0,317	0,163	čepoliko	granica čepoliko- slojevito
4	80	1,4	0,181	0,190	čepoliko- mjehurasto	čepoliko
5	160	1,4	0,362	0,190	čepoliko- mjehurasto	čepoliko
6	40	1,8	0,0906	0,244	mjehurasto	nije vidljivo na grafu
7	40	0,5	0,0906	0,0679	valovito- čepoliko	nije vidljivo na grafu
8	250	1,5	0,566	0,204	čepoliko-udarno	čepoliko
9	250	2,5	0,566	0,304	udarno	čepoliko
10	100	2,0	0,226	0,272	čepoliko	čepoliko
11	260	0,8	0,589	0,109	čepoliko-udarno	slojevito
12	260	0,4	0,589	0,0543	udarno	slojevito
13	120	0,5	0,272	0,0679	slojevito- čepoliko	čepoliko
14	120	1,7	0,272	0,231	mjehurasto- čepoliko	čepoliko
15	60	2,3	0,136	0,312	mjehurasto- čepoliko	čepoliko



Slika 10. Ucertani podaci za usporedbu po Manhanevovom dijagramu

Tablica 4. Podaci za određivanje pada tlaka po Lockhart – Martinellijevu postupku

broj mjerjenja	$\dot{m}_{A,G}$, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	$\dot{m}_{A,L}$, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	Re_G	Re_L	ξ_G	ξ_L	$(\Delta p/l)_G$, $\text{Pa}\cdot\text{m}^{-1}$	$(\Delta p/l)_L$, $\text{Pa}\cdot\text{m}^{-1}$	X	Φ_{G2}	Φ_L^2	$(\Delta p/l)_{DS}$, $\text{Pa}\cdot\text{m}^{-1}$	$(\Delta p/l)_{exp}$, $\text{Pa}\cdot\text{m}^{-1}$	Odstupanje, %
1	0.452	27.14	313	312	0.204	0.205	1.7	6.1	1.90	14.13	3.91	23.66	26.80	11.75
2	0.452	135.69	313	1560	0.204	0.041	1.7	30.3	4.25	40.35	2.23	67.55	208.50	67.60
3	0.316	162.83	219	1870	0.292	0.034	1.2	36.3	5.57	59.84	1.93	70.13	245.80	71.47
4	0.181	189.97	125	2180	0.511	0.029	0.7	42.4	7.96	143.846	2.27	96.33	268.10	64.07
5	0.362	189.97	250	2180	0.256	0.029	1.3	42.4	5.63	88.900	2.81	119.01	342.60	65.24
6	0.090	244.24	62.6	2810	1.020	0.042	0.3	100.4	17.3	473.82	1.58	158.67	287.50	44.81
7	0.090	67.85	62.6	779	1.020	0.082	0.3	15.1	6.7	79.83	1.77	26.73	44.70	40.20
8	0.565	203.54	391	2340	0.164	0.027	2.1	45.4	4.7	69.28	3.19	145.00	431.90	66.43
9	0.565	339.23	391	3900	0.164	0.40	2.1	184.4	9.4	182.96	2.08	382.91	744.70	48.58
10	0.226	271.38	157	3120	0.409	0.041	0.8	121.0	12.0	265.68	1.84	222.42	521.30	57.33
11	0.588	108.55	407	1250	0.157	0.051	2.2	24.2	3.3	45.49	4.09	99.01	217.50	54.48
12	0.588	54.28	407	624	0.157	0.103	2.2	12.1	2.4	18.36	3.30	39.96	90.90	56.04
13	0.271	67.85	188	779	0.341	0.082	1.0	15.1	3.9	35.48	2.35	35.64	65.50	45.58
14	0.271	230.67	188	2650	0.341	0.040	1.0	85.3	9.2	177.99	2.10	178.81	443.80	59.71
15	0.136	312.09	93.9	3590	0.681	0.041	0.5	160.0	17.8	497.90	1.56	250.10	539.20	53.62

Tablica 4. Podaci za određivanje pada tlaka po Bakerovu postupku

broj mjerjenja	$\dot{m}_{A,G}$, kg/m ² s ⁻¹	$\dot{m}_{A,L}$, kg/m ² s ⁻¹ s	po Bakeru	X	Φ	$(\Delta p/l)_{exp}$, Pa/m	$(\Delta p/l)_{exp}$, Pa·m ⁻¹	Odstupanje, %
1	0.452	27.14	čepoliko	1.90	8.68	126.01	26.80	370.19
2	0.452	135.69	čepoliko	4.25	12.92	279.51	208.50	34.06
3	0.316	162.83	čepoliko	5.57	15.69	288.43	245.80	17.34
4	0.181	189.97	čepoliko	7.96	20.59	283.84	268.10	5.87
5	0.362	189.97	čepoliko	5.63	15.41	318.23	342.60	7.11
6	0.090	244.24	mjehurasto	17.3	35.93	432.39	287.50	50.40
7	0.090	67.85	čepoliko	6.7	22.14	164.12	44.70	267.16
8	0.565	203.54	udarno	4.7	10.76	242.40	431.90	43.88
9	0.565	339.23	udarno	9.4	14.75	455.63	744.70	38.82
10	0.226	271.38	čepoliko	12.0	28.74	691.55	521.30	32.66
11	0.588	108.55	čepoliko	3.3	11.22	274.26	217.50	26.10
12	0.588	54.28	čepoliko	2.4	9.39	191.92	90.90	111.14
13	0.271	67.85	čepoliko	3.9	13.84	192.46	65.50	193.84
14	0.271	230.67	čepoliko	9.2	23.54	556.47	443.80	25.39
15	0.136	312.09	slojevito	17.8	72.92	2670.57	539.20	395.28

5.0. RASPRAVA

U ovom radu pokušalo se usporediti postupke procjene pada tlaka trenjem kod horizontalnog dvofaznog strujanja, navedene u teorijskom dijelu, s obzirom na režime strujanja kapljevite i plinovite faze, kao i pojavne oblike dvofaznog strujanja.

Usporedbom vlastitih opažanja o pojavnim oblicima strujanja s predviđanjima na temelju Bakerovog i Manhdaneovog dijagrama (Slika 2. i Slika 3.), pokazalo se da nije uvijek postignuto dobro slaganje. Opaženi nesklad je vjerojatno posljedica zanemarivanja utjecaja promjera cijevi na prijelazna područja između pojedinih oblika horizontalnog dvofaznog strujanja.

Vizualnim opažanjem uočena su dva čista pojavna oblika: udarno i čepoliko, te četiri koja su bila u prijelaznom području između: slojevito- čepoliko, čepoliko - mjehurasto, valovito - čepoliko i čepoliko - udarno.

Na osnovi kvantitativnih pokazatelja te primjenom Bakerovog dijagrama (B_x, B_y) utvrđeno je da su uz različite protoke zraka i vode ostvareni slijedeći oblici strujanja: čepoliko, slojevito, udarno i mjehurasto. Primjenom Manhdaneovog dijagrama (v_G, v_L) utvrđeno su oblici strujanja: čepoliko i slojevito, te dva strujanja u prijelaznom području slojevito - čepoliko. Najviše vizualnih opažanja se s izračunatim rezultatima slaže za čepoliko strujanje, a bolje slaganje s vizualnim određivanjem pojavnog oblika postiže se korištenjem Bakerovog dijagrama.

Da bi se u kojoj mjeri poznati postupci zadovoljavaju pri izračunu pada tlaka kod dvofaznog strujanja provedena je usporedba izmjerenih vrijednosti pada tlaka i vrijednosti izračunatih korištenjem Lokart Martinellijevog i Bakerovog postupka. Može se zaključiti da se korišteni postupci uglavnom ne podudaraju s eksperimentalno određenim vrijednostima pada tlaka. Nešto bolje slaganje dobiva se korištenjem Lokart Martinellijevog postupka, postignuta odstupanja kreću se od 11.75-71.47%. Korištenjem Bakerovog dijagrama, najveća odstupanja javljaju se uglavnom pri najnižim protocima kapljevine te kod slojevitog strujanja. Mogući razlog je ograničenje korištenih jednadžbi za određenu geometriju (promjer cijevi) ili neprikladnost za određeni maseni odnos kapljevite i plinske faze.

6.0. ZAKLJUČAK

- ✓ Mjerenje je provedeno u sustavu zrak - voda u horizontalnoj cijevi promjera 0,0125 m, pri protocima vode od 0,2 do 2,5 l/min i protocima zraka od 40 do 260 l/h.
- ✓ Na temelju provedenih mjerenja utvrđeni su slijedeći pojavni oblici strujanja : čepoliko, slojevito, udarno i mjehurasto.
- ✓ Većina pojava oblika čepolikog strujanja koja su određena vizualnim opažanjem podudaraju se i na Bakerovom dijagramu nakon izračunatih koordinata. Oni pojavni oblici određeni vizualnim opažanjem koji su bili na granici između čepoliko - mjehurasto, čepoliko - valovito ili čepoliko - slojevito, nakon izračunatih koordinata u Bakerovom dijagram određeni su kao čepoliko strujanje.
- ✓ Pojavom plinovite faze u struji kapljevine znatno se povećava pad tlaka u odnosu na jednofazno strujanje pa je zato nužno poznavati postupke za procjenu pada tlaka u takvim sistemima.
- ✓ Provedena je usporedba eksperimentalno određenih vrijednosti pada tlaka i vrijednosti izračunatih korištenjem Lokart Martinellijevog i Bakerovog postupka.
- ✓ Korišteni postupci uglavnom ograničeno su primjenjivi za određivanje pada tlaka pri dvofaznom strujanju.

7.0. SIMBOLI

A	površina poprečnog presjeka cijevi (m^2)
B_x	apcisa Bakerovog dijagrama
B_y	ordinata Bakerovog dijagrama
d	promjer cijevi (m)
Fr_m	modificirana Froudeova značajka
g	gravitacijsko ubrzanje ($m \cdot s^{-2}$)
l	duljina cijevi (m)
Δh	razlika u visini stupca manometarske tekućine (m)
\dot{m}	maseni protok ($kg \cdot s^{-1}$)
\dot{m}_A	gustoća masenog toka ($kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)
$(\Delta p/l)$	pad tlaka po jedinici duljine ($Pa \cdot m^{-1}$)
Δp	pad tlaka (Pa)
R	omjer gustoća kapljevite i plinske faze
Re	Reynoldsova značajka
\dot{V}	volumni protok ($m^3 \cdot s^{-1}$)
v	srednja brzina strujanja ($m \cdot s^{-1}$)
X	Lockhart - Martinellijeva značajka
x	maseni udio plinovite faze
ϕ	volumni udio plinovite faze po presjeku cijevi
η	dinamička viskoznost ($Pa \cdot s$)
λ	parametar Bakerovog postupka
$\bar{\rho}$	srednja gustoća ($kg \cdot m^{-3}$)
ρ	gustoća ($kg \cdot m^{-3}$)
σ	površinska napetost ($N \cdot m^{-1}$)
ξ	koeficijent trenja
ψ	parametar Bakerovog postupka
Φ	funkcije Lockhart - Martinellijevog pokazatelja dvofaznog strujanja plinske (G) i kapljevite faze (L)

INDEKSI :

a	ubrzanje
f	trenje
s	statički
exp	eksperimentalno
G	plinovita faza
L	kapljevita faza
DS	dvofazno strujanje
MK	manometarska kapljevina

8.0. LITERATURA

1. G.E.Alves, Cocurrent liquid - gas flox in a pipline contactor, Chem. Eng. Progr., 50 (1954) 449 - 456
2. Ž. Olujić, Predviđanje pojavnih oblika pri horizontalnom dvofaznom strujanju plinsko - kapljevinskih smjesa u cijevima, Kem. Ind., 29 (1980) 543 - 549
3. G. V. Govier i K. Aziz, The flow of complex mixtures in pipes, Van Nostrand Rainhold Co., New York 1972., str. 516 - 525
4. J. M. Manhdane, G. A. Gregory i K. Aziz, A flow pattern map for gas - liquid flow in horizontal pipes, Int. J. Multiphase flow, 1 (1974) 537 - 553
5. Ž. Olujić i M. Chawla, Pad tlaka trenjem izotermnog horizontalnog dvofaznog strujanja plinsko - kapljevinskih smjesa većih omjera viskoznosti II, Kem. Ind. 28 (1979) 305
6. E. Beer, Priručnik za dimenzioniranje uređaja kemijske procesne industrije, SKTH/Kemija u industriji, Zagreb 1985., str. 2 - 40
7. A.E. Dukler, M. Wicks i R.G.Cleveland, Frictional Pressure drop in two - phase flow, A.I.Ch.Journal, 10 (1964) 44 - 51
8. Ž. Olujić i E. Bauman, Utjecaj hrapavosti stijenki na pad tlaka trenjem kod horizontalnog dvofaznog strujanja plin - kapljevina, Kem. Ind., 28 (1979) 581 - 587
9. Ž. Olujić, Pad tlaka pri valovitom dvofaznom strujanju u cijevima, Kem. Ind., 25 (1976) 327 - 332

ŽIVOTOPIS

Rođena sam 07.11.1990. u Sisku. Osnovno obrazovanje stekla sam u Osnovnoj školi u Selima. 2005. godine upisujem Tehničku školu u Sisku, usmjerenja ekološki tehničar. 2009. godine maturiram s odličnim uspjehom. Iste godine upisujem Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije kao redovan student preddiplomskog studija Ekoinženjerstva.