

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ

Милош З. Михаиловић

**Топлотне перформансе и пад притиска код
цевног размењивача топлоте са завојним
ребрима и троугластим распоредом цеви**

ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

Београд, 2020

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

Milos Z. Mihailovic

**Heat performances and pressure drop of helically-
finned tube heat exchangers with triangular tube
arrangement**

DOCTORAL DISSERTATION

Belgrade, 2020

Ментор:

др Србислав Генић редовни професор, Универзитет у Београду, Машински факултет

Чланови комисије:

1. др Александар Петровић, редовни професор, Универзитет у Београду, Машински факултет;
2. др Мирјана Стаменић, ванредни професор, Универзитет у Београду, Машински факултет;
3. др Урош Милованчевић, ванредни професор, Универзитет у Београду, Машински факултет;
4. др Милан Миливојевић, ванредни професор, Универзитет у Београду, Технолошко-металуршки факултет

Датум одбране: _____ 2020. godine

Топлотне перформансе и пад притиска код цевног размењивача топлоте са завојним ребрима и троугластим распоредом цеви

Апстракт

Цевни размењивачи топлоте са завојним оребрењем имају широку примену у термотехници, процесној индустрији и термоенергетици као хладњаци, грејачи, испаривачи и кондензатори. Често се у индустријској примени користе као хладњаци, при чему се као расхладни флуид користи ваздух при попречном струјању преко снопа цеви. Због сложене струјне слике која се формира том приликом немогуће је предвидети вредности пада притиска и размењене топлоте на основу искључиво теоријских разматрања, па се највећи део објављених истраживања ослања на експериментални рад.

У циљу утврђивања поуздане прорачунске процедуре за одређивање коефицијента прелаза топлоте и коефицијента трења при струјању гасовитог флуида преко завојно оребреног цевног снопа, спроведена су експериментална мерења на три различите конфигурације размењивача топлоте. Користећи сопствене као и експерименталне податке из отворене литературе, формирана је база са великим бројем различитих радних режима са широким опсегом геометријских величина као што су пречник цеви, број редова цеви, корак цеви, корак ребра, висина ребра и сл. и за различите температуре и протоке радних флуида.

У отвореној литератури постоји одређени број једначина на основу којих се могу одредити коефицијент прелаза топлоте и коефицијент трења, а које се најчешће користе у индустријској пракси. Применом ових једначина на формирану базу података, уочена је њихова непоузданост, односно да се измерене вредности значајно разликују од вредности добијених употребом доступних једначина. Осим тога, уочено је и да се вредности коефицијената прелаза топлоте и коефицијената трења израчунатих према различитим једначинама значајно разликују. Један од главних разлога ове појаве је чињеница да нико од аутора постојећих корелација није поредио своје податке са подацима других аутора, па су објављене корелације ограничене на сопствена експериментална истраживања.

Оригинални допринос дисертације се састоји у коришћењу карактеристичне брзине струјања и карактеристичне геометријске величине у Рејнолдсовом и Нуселтовом броју сведених на новоуведене параметре. Применом савремених нумеричких израчунавања, добијене су оригиналне једначине за одређивање отпора струјању и коефицијента прелаза топлоте при попречном струјању ваздуха и других гасова преко снопа оребрених цеви, које се могу са сигурношћу користити у инжењерској пракси.

Ова дисертација представља наставак истраживања проблема везаних за размењиваче топлоте у различитим индустријским гранама која се спроводе преко 40 година на Машинским факултету Универзитета у Београду.

Кључне речи: Размењивач топлоте са оребреним цевима, завојна ребра, прелаз топлоте, пад притиска

Научна област: Машинство

Ужа научна област: Процесна техника

УДК број: 662.987: 66.045.1(043.3)

Heat performances and pressure drop of helically-finned tube heat exchangers with triangular tube arrangement

Abstract

Helically-finned tube heat exchangers are widely used in HVAC, process and power industry as coolers, heaters, evaporators and condensers. Very often, these heat exchangers are used for cooling, using air as a cooling agent in a cross-flow over a tube bank. The complex flow pattern across the fin and tube surface made the theoretical prediction of pressure drop and heat exchanged very difficult and therefore most of the published investigations were related to the experimental work.

In order to establish a reliable procedure for the determination of a heat transfer and a pressure drop coefficient with gaseous fluids flow across helically-finned tube bundles, experimental measurements on three different heat exchanger configurations are conducted. Using own as well as experimental data from the open literature, a database with a large number of different working regimes was formed, with a wide range of geometric variables such as tube diameter, number of tube rows, tube pitch, fin pitch, fin height, etc. and for different temperatures and flows of working fluids.

In the open literature there is a certain number of correlations for determination of heat transfer and friction factor coefficients, which are most commonly used in the industrial practice. By applying these equations to the formed database, unreliability of equations was found, that is, the measured values differ significantly from the values obtained using the available equations. Furthermore, it was observed that the values of the heat transfer and the friction factor coefficients calculated according to different available equations differ significantly. One of the main reasons for this is the fact that none of the authors did not compare their data with the data of other authors, so the published correlations are therefore limited to experimental data of individual case studies.

The original contribution of the dissertation consists of the use of a characteristic flow velocity and a characteristic dimension in Reynolds and Nusselt numbers reduced to the newly introduced parameters. Using modern numerical calculations, original equations were obtained for determining the flow resistance and the heat transfer coefficient, in the cross-flow of air and other gases over a tube bank, which can be safely used in engineering practice.

This dissertation is a continuation of research into problems related to heat exchangers in various industries that have been implemented for over 40 years at the Faculty of Mechanical Engineering, University of Belgrade.

Keywords: Finned tube heat exchanger, Helical fins, Heat transfer, Pressure drop.

Scientific field: Mechanical engineering

Scientific subfield: Process engineering

UDC number: 662.987: 66.045.1(043.3)

САДРЖАЈ

1	Увод.....	1
2	Примена и основне карактеристике размењивача топлоте са оребреним цевима	3
2.1	Општа подела размењивача топлоте са оребреним цевима	4
2.1.1	Размењивачи топлоте хлађени ваздухом.....	4
2.1.2	Размењивачи топлоте са оребреним цевима смештени у канале.....	15
3	Размена топлоте и пад притиска код размењивача топлоте са оребреним цевима...17	
3.1	Теорија сличности	17
3.1.1	Сличност физичких појава.....	17
3.1.2	Теореме теорије сличности.....	20
3.1.3	Критеријуми сличности и критеријалне једначине при транспорту количине кретања.....	21
3.1.4	Критеријуми сличности и критеријалне једначине за размену топлоте	23
3.2	Аналогија преноса количине кретања и преноса топлоте	26
3.2.1	Рејнолдсова аналогија	26
3.2.2	Chilton – Colburn аналогија.....	32
3.3	Геометријске карактеристике размењивача топлоте са завојним ребрима потребне за анализу топлотних перформанси и пада притиска.....	32
4	Преглед експерименталних података и постојећих корелација из отворене литературе 35	
4.1	Jameson и Schenectady [17].....	35
4.2	Trane Company Bulletin [19].....	38
4.3	В. Ф. Юдин [20]	39
4.4	Eckels и Rabas [21]	44
4.5	He FaJiang, Cao WeiWu и Yan Ping [22].....	46
4.6	Постојеће корелације.....	46
4.6.1	A. Y. Gunter и W. A. Shaw [23]	46
4.6.2	Briggs и Young [28]	47
4.6.3	Robinson и Briggs [29].....	48
4.6.4	Nir [30]	48
5	Опис експерименталне инсталације	52
5.1	Инсталација за испитивање интензитета размене топлоте.....	53

5.2	Инсталација за испитивање пада притиска.....	54
6	Математичка обрада резултата експеримената	55
6.1	Процена квалитета резултата мерења.....	55
6.2	Статистичко корелисање помоћу метода најмањих квадрата.....	60
6.2.1	Линеарна регресија.....	62
6.2.2	Нелинеарна регресија.....	63
7	Анализа резултата.....	65
7.1	Карактеристичне величине и бездимензиони бројеви.....	65
7.1.1	Прерачунавање бездимензионих бројева аутора Jameson и Schenectady [17]	66
7.1.2	Прерачунавање бездимензионих бројева објављених у Trane Company Bulletin [19].....	68
7.1.3	Прерачунавање бездимензионих бројева аутора В. Ф. Юдин [20].....	69
7.1.4	Прерачунавање бездимензионих бројева аутора Eckels и Rabas [21]	70
7.1.5	Прерачунавање бездимензионих бројева аутора Gunter и Shaw [23].....	71
7.1.6	Прерачунавање бездимензионих бројева аутора Briggs и Young [28]	73
7.1.7	Прерачунавање бездимензионих бројева аутора Robinson и Briggs [29].....	73
7.1.8	Прерачунавање бездимензионих бројева аутора Nir [30].....	74
7.2	Опсег анализираних података и број анализираних радних режима	76
7.3	Корелација за коефицијент отпора при струјању ваздуха преко снопа завојно оребрених цеви.....	78
7.4	Корелација за интензитет прелаза топлоте при струјању ваздуха преко цевног снопа са завојним оребрењем.....	82
7.5	Аналогија преноса количине кретања и преноса топлоте	85
7.6	Дискусија о резултатима.....	87
8	Закључна разматрања.....	89
9	Литература.....	91
10	Прилози.....	96
10.1	Резултати мерења топлотних и струјних перформанси размењивача са завојно оребреним цевима.....	97
10.2	Експериментални подаци из отворене литературе – пад притиска.....	109
10.3	Експериментални подаци из отворене литературе – прелаз топлоте.....	148

СПИСАК КОРИШЋЕНИХ ОЗНАКА

Ознаке које започињу латиничним словима

a (m^2/s),	топлотна дифузивност;
A (m^2),	површина попречног пресека апарата;
A_{av} (m^2),	површина попречног пресека канала вентилатора;
\tilde{c}_p ($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$),	специфични топлотни капацитет при сталном притиску;
d (m),	пречник;
d_{kr} (mm),	пречник у корену ребра;
d_h (m),	хидраулични пречник;
D_{av} (m),	пречник канала вентилатора;
d_e (mm),	еквивалентни пречник;
d_r (m),	пречник ребра;
Eu ,	Ојлеров број;
E_v (m^2/s),	турбулентна кинематска вискозност;
E_a (m^2/s),	турбулентна топлотна дифузивност;
f ,	фанингов коефицијент трења;
Fr ,	Фрудов број;
G ($\text{kg} / (\text{h} \cdot \text{m}^2)$),	масена брзина;
g (m/s^2),	убрзање силе теже;
h_r (m),	висина ребара;

H (m),	висина;
H_{av} (m),	дужина канала вентилатора;
H_p (m),	растојање од осе вентилатора до цевног снопа;
j_H ,	Solburn фактор;
k (W/(m ² · K)),	кофицијент пролаза топлоте;
KO ,	корелациони однос;
K_{or} ,	кофицијент оребрења;
K_l ,	кофицијент геометријске сличности;
K_τ ,	кофицијент хомохроности;
K_u ,	кофицијент сличности;
$K_{z,h}$,	корекциони фактор коефицијента прелаза топлоте који зависи од броја редова цеви;
$K_{z,p}$,	корекциони фактор за пад притиска који зависи од броја редова цеви;
l ,	карактеристична дужина;
L (m),	дужина;
L_c (m),	дужина цеви;
MO ,	максимална грешка у дијапазону промене независно променљиве;
\dot{m} (kg/s),	масени проток;
N_c ,	укупан број цеви;
N_{ct} ,	број цеви у чеоном реду;
N_{cl} ,	број редова цеви;

N_{reb} ,	укупни број ребара по једној цеви;
N_r (m^{-1}),	број ребара по јединичној дужини цеви;
Nu ,	Нуселтов број;
Pr ,	Прантлов број;
p_{mb} (mmH_2O),	надпритисак ваздуха испред мерне бленде;
Pe ,	Пеклеов број;
p (Pa),	статички притисак;
p_b (Pa),	барометарски притисак;
\dot{q} (W/m^2),	специфични топлотни флуks;
\dot{Q} (W),	топлотна снага размењивача топлоте;
$\bar{\dot{Q}}$ (W),	средња вредност топлотне снаге;
R_b ,	фактор који је дефинисан односом слободне површине попречног пресека у правцу струјања и слободне површине попречног пресека између ребара цеви;
Re ,	Рејнолдсов број;
S_f (m^2),	слободна површина попречног пресека између ребара цеви;
s_d (m),	дијагонално растојање између два узастопна реда цеви;
s_k ($W/(m^2 \cdot K)$),	дисперзија коефицијента пролаза топлоте;
s_l (m),	подужни корак цеви;
S_{kr} (m^2),	површина у корену ребра када не би постојала ребра;
s_m (kg/s),	грешка мерења протока;
s_{mr} (m^2/m^3),	међуребарна површина;

s_Q (W),	грешка мерења топлотне снаге износи;
s_r (m),	корак ребра;
S_r (m ²),	површина ребара;
S_{rt} (m ²),	површина за размену топлоте;
S_s (m ²),	спољашња површина оребрене цеви;
S_{sl} (m ²),	слободна површина попречног пресека у правцу струјања;
S_{sp} (m ²),	површина за размену топлоте са спољашње стране глатке (неоребрене) цеви;
s_t (m),	попречни корак цеви;
s_t (°C),	грешка мерења температуре;
S_{un} (m ²),	површина за размену топлоте са унутрашње стране цеви;
s_v (m ² / m ³),	специфична површина оребрене површине;
$s_{\Delta t_{sr}}$ (°C),	дисперзија средње температурске разлике $s_{\Delta t_{sr}}$ је функција четири мерене вредности температуре;
SD ,	средње квадратно одступање;
St ,	Стентонов број;
t (°C),	температура;
T (K),	апсолутна температура;
t_v (°C),	температура ваздуха;
$t_{v, sr}$ (°C),	средња температура у току најтоплијег месеца у години за последњих десет година;
$t_{v, max}$ (°C),	максимална температура ваздуха за последњих десет година;

T_i (K),	апсолутна температура на граници;
T_∞ (K),	апсолутна температура у основној маси флуида;
u_1, u_2, \dots, u_n ,	физичке величине помоћу којих се описује одређена класа појава;
V_{\min} (m ³)	запремина међуцевног простора;
\dot{V} (m ³ /s),	запремински проток;
w (m/s),	брзина;
w_m (m/s),	средња брзина флуида;
w_i (m/s),	брзина струјања на граници;
w_∞ (m/s),	брзина струјања у основној маси флуида;
w_{kan} (m/s),	брзина сведена на површину попречног пресека (фасадна брзина);
w_ε (m/s),	брзина струјања сведена на порозни пресек размењивача;
W (m),	ширина;
W_N (m ² / m ²),	однос површине за размену топлоте са стране ребара и слободне проточне површине;
z, z_1, z_2, z_3 (m),	координате;

Ознаке које почињу грчким словима

α (W/(m ² · K)),	кофицијент прелаза топлоте;
δ_r (m),	дебљина ребра;
δ_w, δ_T (m),	дебљина филма флуида;
Δp (Pa),	пад притиска или разлика притисака;

Δt (°C),	разлика температура;
ΔT (K),	разлика температура;
Δw (m/s),	разлика брзине флуида;
Δ_{St} ,	стационарност радног режима;
Δt_{sr} (°C),	средња температурска разлика;
$\varepsilon_{пов}$ (m ² / m ²),	површинска порозност;
ε (m ³ /m ³),	запреминска порозност;
ε ,	корекциони фактор за средњу температурску разлику;
ϕ_D (°),	угао дисперзије ваздушне струје;
ξ ,	коэффициент отпора;
λ (W/(m·K)),	топлотна проводност;
μ (Pa·s),	динамичка вискозност;
ν (m ² /s)	кинематска вискозност;
η ,	ефикасност оребрене површине;
π ,	однос обима и пречника кружнице;
ρ (kg/m ³),	густина;
σ (Pa),	тангенцијални напон;
τ (s),	временски интервал;

Индекси

1,	топлији флуид;
2,	хладнији флуид;
\bar{a} ,	просечна вредност;
c ,	цев;
u ,	унутрашње;
s ,	спољашње;

СПИСАК СЛИКА

Слика	Наслов
2.1	Распоред цеви у цевном снопу;
2.2	Ваздушни хладњак са потисним вентилатором;
2.3	Ваздушни хладњак са усисним вентилатором;
2.4	Размењивач топлоте са ваздушним хлађењем са завареном конструкцијом коморе за процесни флуид;
2.5	Размењивач топлоте са ваздушним хлађењем са раздвојивим коморама;
2.6	Размењивач топлоте са ваздушним хлађењем са раздвојивим поклопцима;
2.7	Размењивачи топлоте са ваздушним хлађењем са коморама израђеним од цевних сегмената;
2.8	Основни начини постављања цевног снопа и вентилатора;
2.9	Ваздушни хладњак са једним или више вентилатора;
2.10	Геометријске величине везане за постављање аксијалних вентилатора;
3.1	Промена брзине струјања и температуре у складу са филмском теоријом;
3.2	Распоред цеви и карактеристични геометријски параметри;
4.1	Зависнос Колбурновог фактора и коефицијента трења од Рејнолдсовог броја за размењивач топлоте JS-1, преузет из [18];
4.2	Геометријски параметри оребрених цеви размењивача испитиваних у [20];
4.3	Формирања оребрења са тракама са „L“ и са „T“ постољем;
4.4	Зависност Колбурновог фактора од Рејнолдсовог броја (лево) и коефицијента трења од Рејнолдсовог броја (десно) и њихово поређење са подацима осталих аутора, преузето из [21];
4.5	Корелација (4.27) примењена на експерименталне податке различитих аутора, преузето из [30];

- 4.6 Корелација (4.29) примењена на експерименталне податке различитих аутора, преузето из [30];
- 5.1 Шематски приказ експерименталне инсталације за испитивање интензитета размене топлоте;
- 5.2 Шематски приказ експерименталне инсталације за испитивање пада притиска;
- 6.1 Корелационо поље и функција (6.26);
- 7.1 Коефицијент отпора струјању у функцији Рејнолдсовог броја;
- 7.2 Корелација (7.72) примењена на расположиве експерименталне податке;
- 7.3 Паритетни дијаграм једначине (7.72) у односу на измерене вредности;
- 7.4 Корелација (4.22) примењена на расположиве експерименталне податке;
- 7.5 Корелација (4.29) примењена на расположиве експерименталне податке;
- 7.6 Нуселтов број у функцији од Рејнолдсовог броја;
- 7.7 Корелација (7.74) примењена на расположиве експерименталне податке;
- 7.8 Паритетни дијаграм једначине (7.74) у односу на измерене вредности;
- 7.9 Корелација (4.27) примењена на расположиве експерименталне податке;
- 7.10 Корелације (7.75) и (7.76) примењене на експерименталне податке;

СПИСАК ТАБЕЛА

Табела	Наслов
2.1	Препоручени геометријски односи и величине везани за избор и постављање аксијалних вентилатора;
4.1	Геометријске карактеристике размењивача топлоте датих у [18];
4.2	Геометријске карактеристике размењивача топлоте датих у [18];
4.3	Коефицијенти за корелације топлотних и струјних перформанси датих у [18];
4.4	Геометријске карактеристике размењивача топлоте на којима је испитиван пад притиска;
4.5	Геометријске карактеристике размењивача топлоте на којима је испитиван прелаз топлоте;
4.6	Геометријске карактеристике размењивача топлоте из чланка [21];
5.1	Геометријске карактеристике испитиваних размењивача топлоте;
7.1	Табеларни преглед аутора који су објавили експерименталне податке или корелације за пад притиска и/или интензитет размене топлоте;
7.2.1	Опсег анализираних података;
7.2.2	Број анализираних радних режима;
7.3.1	Параметри за корелацију (7.71);
7.3.2	Параметри за корелације (4.22) и (4.29);
7.4.1	Параметри за корелацију (7.73);
7.4.2	Параметри за корелацију (4.27);
7.5.1	Параметри за корелације (7.75) и (7.76);

1 УВОД

Размењивачи топлоте су апарати који омогућавају размену унутрашње топлотне енергије између флуида различитих температура. Флуиди су раздвојени размењивачком површином која спречава њихово мешање. Опсег примене размењивача топлоте је изузетно широк. Користе се у системима за грејање и климатизацију, у фабрикама за производњу електричне енергије, у хемијској и петрохемијској индустрији, у индустрији прераде отпадних вода и сл. као загрејачи, хладњаци, испаривачи или кондензатори. Поред наведених примена у којима се користе као основни уређаји, размењивачи топлоте се користе и као помоћни уређаји који омогућавају рад сложених система као што су мотори са унутрашњим сагоревањем, електрични трансформатори и сл.

Оребрени цевни размењивачи топлоте се користе при размени топлоте између флуида које карактеришу значајно различите вредности коефицијената прелаза топлоте, као што су течни и гасовити флуиди, при чему је вредност коефицијената прелаза топлоте гасовитих флуида знатно нижа. Постављањем оребрења на цеви са стране гасовитог флуида повећава се површина за размену топлоте и до 50 пута, чиме се компензује нижа вредност коефицијента прелаза топлоте, али се повећава вредност пада притиска при струјању гаса, чиме се повећавају транспортни трошкови. Због тога се поред услова везаних за размену топлоте, код ових апарата увек поставља и оштар услов у вези са падом притиска при струјању кроз размењивач.

Цевни размењивачи топлоте са завојним оребрењем имају широку примену у процесној индустрији, термотехници и термоенергетици. Често се у индустријској примени користе као хладњаци, при чему се као расхладни флуид користи ваздух при попречном струјању преко снопа цеви. Због сложене струјне слике која се формира том приликом немогуће је предвидети вредности пада притиска и размењене топлоте на основу искључиво теоријских разматрања, па се највећи део објављених истраживања ослања на експериментални рад.

У доступној литератури постоји више једначина на основу којих се може израчунати вредност размењене топлоте или пада притиска на цевним размењивачима топлоте са завојним оребрењем. Међутим, анализом је утврђено да се вредности коефицијената прелаза топлоте и пада притиска израчунатих према различитим једначинама значајно разликују. Такође, у поменутих једначинама постоји низ утицајних параметара који се одређују на различите начине. Генерално, може се констатовати да се једначине из литературних извора морају детаљно проучити, те да се ни једној од њих не може дати предност пре експерименталне провере.

На Машинском факултету Универзитета у Београду, у оквиру Катедре за процесну технику се преко 30 година врше систематска истраживања топлотних и флуидодинамичких перформанси рекуперативних и контактних размењивача топлоте у које спадају:

- цевни размењивачи топлоте (оребрени и неоребрени размењивачи топлоте са унакрсним током струјања, добошаста размењивачи топлоте са правим и завојним цевима, размењивачи топлоте цев-у-цев);
- контактни кондензатори;
- плочаста размењивачи топлоте;
- куле за хлађење воде.

Циљ ове дисертације је да се на основу резултата сопственог експерименталног рада, као и резултата истраживања из доступне литературе, пронађе поуздана прорачунска процедура за

одређивање коефицијента прелаза топлоте и коефицијента трења за широк опсег Рејнолдсових бројева и за различите геометријске карактеристике цевних размењивача топлоте са завојним оребрењем који се најчешће срећу у индустријској пракси.

Из циља истраживања проистичу следећи задаци истраживања:

- преглед и систематизација прорачунских процедура препоручених у досадашњим радовима и литератури;
- израда одговарајућег математичког модела понашања размењивача топлоте са оребреним цевним снопом;
- преглед и систематизација експерименталних података других истраживача (из отворених литературних извора);
- израда физичког модела (експерименталне инсталације);
- спровођење експерименталних истраживања на физичком моделу;
- успостављање прорачунске процедуре за коефицијент прелаза топлоте и коефицијент трења код размењивача топлоте са завојним ребрима;
- извођење закључка.

2 ПРИМЕНА И ОСНОВНЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ РАЗМЕЊИВАЧА ТОПЛОТЕ СА ОРЕБРЕНИМ ЦЕВИМА

Размењивачи топлоте са оребреним цевима спадају у рекуперативне размењиваче топлоте код којих су флуиди између којих се размењује топлота раздвојени непропусном баријером [1].

Ови размењивачи топлоте спадају у веома компактне уређаје и имају широку примену у индустрији. Примењују се када је један од флуида на вишем притиску и када се вредности коефицијента прелаза топлоте радних флуида знатно разликују. На пример, код гасно – течних размењивача топлоте, коефицијент прелаза топлоте на воденој страни има веома високу вредност у поређењу са гасном страном. Ребра се постављају са гасне стране да би се повећала површина за размену топлоте. У општем случају, ребра се могу поставити са спољашње стране цеви, са унутрашње стране цеви или са обе стране цеви (када оба радна флуида имају ниску вредност коефицијента прелаза топлоте), у зависности од примене.

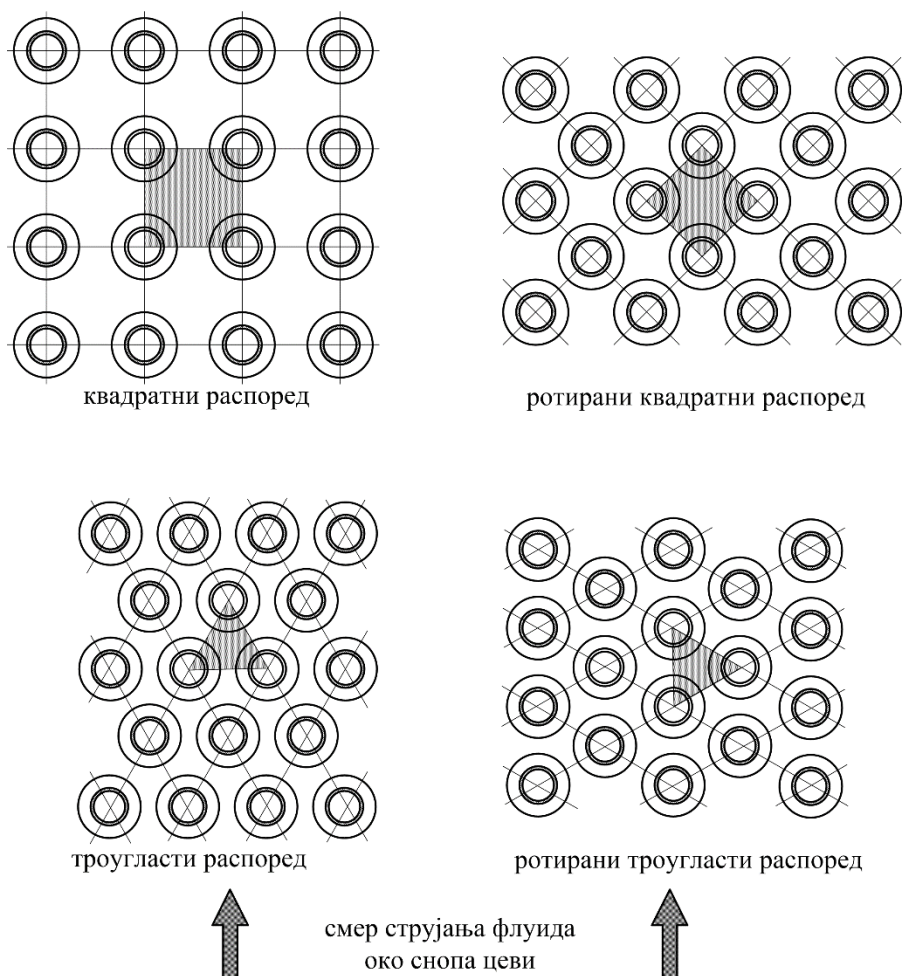
Према [2], може се извршити подела оребрених цеви према висини ребара на:

- нискооребрене цеви са висином ребара у опсегу 1 – 2 mm;
- средњеоребрене цеви са висином ребара око 3,2 mm;
- високооребрене цеви са висином ребара у опсегу 6,4 – 25 mm.

Ниско оребрење се углавном формира истискивањем из основног материјала дебелозиде цеви. Ова врста оребрења се углавном користи код добошастих размењивача топлоте, а број ребара се креће у опсегу од 200 – 1600 ребара по дужном метру, а најчешће око 750 ребара по дужном метру цеви. Овако оребрене цеви су термички најефикасније с обзиром да не може доћи до прекида контакта између цеви и ребара услед корозије, термичке експанзије или механичког оштећења. Средње и високо завојно оребрење се формира намотавањем траке око цеви уз затезање ради остваривања доборог контакта на месту споја. При изради је неопходно да се крајеви ребра чврсто везују за носећу цев (заваривањем, тврдим лемљењем или лемљењем) да би се спречила појава лошег контакта на месту споја оребрења и носеће цеви услед пузања, и само оребрење не би у том случају испунило свој основни захтев.

Материјали од којих се израђују цеви зависе од намене размењивача, а најчешће су у употреби бакар, месинг, легура бакар – никл – гвожђе и угљенични челик (који се најчешће користи код рекуператора топлоте). Материјали од којих се израђују ребра су углавном бакар, алуминијум или челик.

Начин формирања цевног снопа од оребрених цеви је приказан на слици 2.1.



Слика 2.1 Распоред цеви у цевном снопу

2.1 Општа подела размењивача топлоте са оребреним цевима

Размењивачи топлоте који се израђују са попречним ребрима са спољашње стране цеви се могу поделити у две велике групе:

- размењиваче топлоте хлађене ваздухом – ваздушни хладњаци;
- размењиваче топлоте смештене у канале.

Код ових размењивача енергетски, односно процесни флуид струји кроз цеви апарата, док са спољашње стране струји ваздух (или неки други гас).

2.1.1 Размењивачи топлоте хлађени ваздухом

Размењивачи топлоте хлађени ваздухом, односно ваздушни хладњаци, су уређаји који се често користе уместо конвенционалних добошастих размењивача са воденим хлађењем за одвођење топлоте од процесних флуида. Имају изузетно широку примену у хемијској, петрохемијској,

процесној и многим другим индустријама. У ваздушним хладњацима се у цевима апарата одвија хлађење или кондензација топлијег флуида, док је ваздух који попречно наструјава цевни сноп амбијенталан. Употреба ваздуха као расхладног флуида је започела почетком прошлог века, а 1948. године је изграђена прва комплетна рафинерија са ваздушним хлађењем [3].

Предности употребе ваздуха за хлађење процесног флуида у односу на воду су следеће:

- ваздух је доступан у неограниченој количини током целе године, и не захтева се његова посебна припрема, док је коришћење воде везано за близину река, мора, језера, итд. при чему је неопходно издвојити нечистоће којих у води има знатно више него у ваздуху;
- ваздух, за разлику од воде, нема кородивно дејство на цеви и ребра размењивача, па на избор материјала од ког се израђује размењивач утиче процесни или енергетски флуид;
- с обзиром да је ваздух као расхладни флуид на атмосферском притиску, механичка напрезања делова апарата се јављају услед притиска процесног флуида, услед чега је размењивач топлоте једноставније конструкције;
- са аспекта заштите животне средине загревање ваздуха има мањи утицај на климатске и друге промене у односу на загревање воде, а и евентуална истицања, односно цурења процесног флуида у воду су много опаснија него иста цурења у ваздушну масу;
- трошкови одржавања ваздушних хладњака износе 20 – 30% од трошкова одржавања хладњака са воденим хлађењем [4]

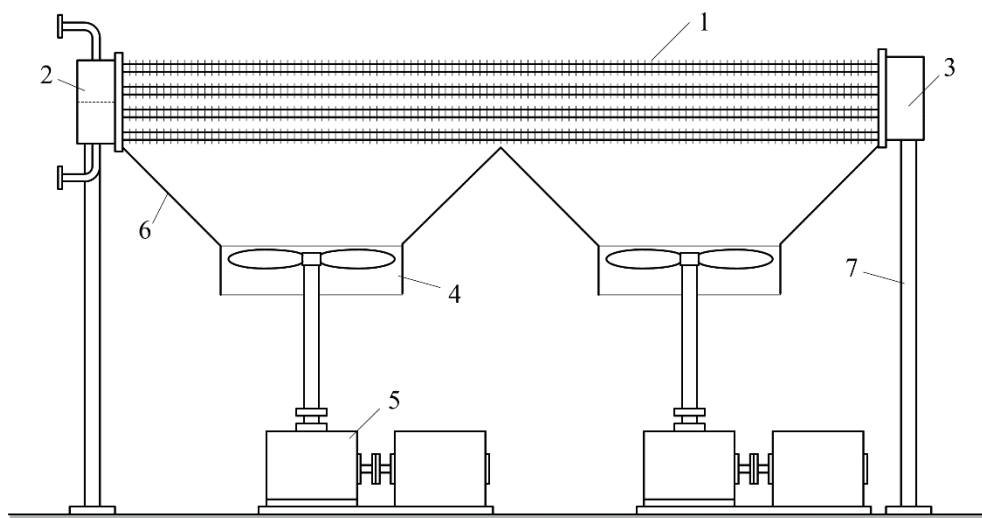
Негативни аспекти употребе ваздуха као расхладног флуида су следећи:

- због ниске вредности коефицијента прелаза топлоте и малог специфичног топлотног капацитета ваздуха, ваздушни хладњаци захтевају знатно већу површину за размену у односу на водене хладњаке, па је самим тим потребан и већи смештајни простор. Међутим, уколико је водени хладњак повезан са кулом за хлађење воде, смештајни простор је сличних димензија [1];
- ваздушни хладњак се не сме постављати у близини великих грађевинских објеката (високе зграде, мостови, итд.) који могу представљати препреку за правилну дистрибуцију ваздуха преко размењивача топлоте услед чега може доћи до рецикулације ваздуха;
- температура спољашњег ваздуха током године може да варира у широком опсегу што утиче на перформансе ваздушног хладњака и знатно отежава контролу температуре процесног флуида, па је неопходна посебна заштита при ниским спољашњим температурама услед којих може доћи до мржњења процесног флуида.

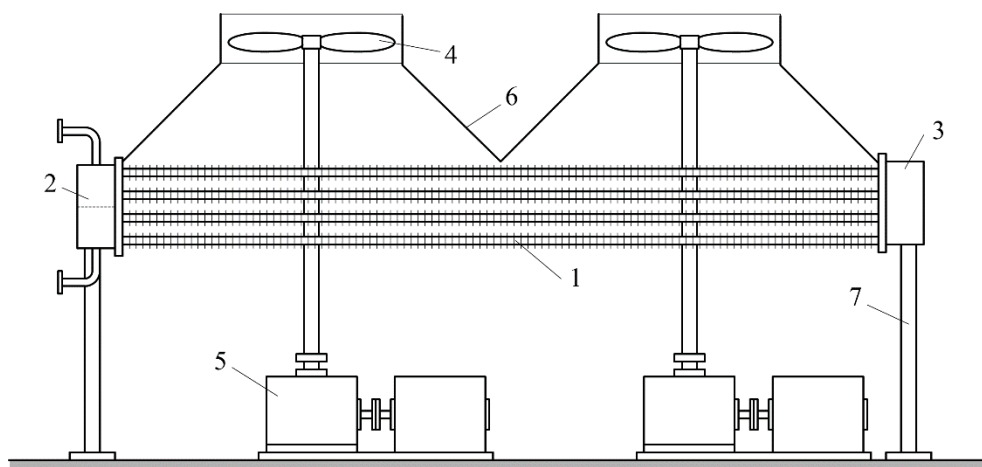
Узевши у обзир наведене чињенице, а имајући у виду више инвестиционе и у истој мери ниже експлоатационе трошкове ваздушних хладњака у односу на добошасте размењиваче топлоте са водом као расхладним флуидом, инжењер треба да спроведе одговарајућу процену оба решења пре коначног избора типа апарата.

2.1.1.1 Конструкционе карактеристике ваздушних хладњака

Шематски приказ ваздушног хладњака са потисним струјањем ваздуха приказан је на слици 2.2, а са усисним струјањем ваздуха на слици 2.3.



Слика 2.2 Ваздушни хладњак са потисним вентилатором



Слика 2.3 Ваздушни хладњак са усисним вентилатором

Размењивач топлоте са ваздушним хлађењем се састоји од цевог снопца са ребраним цевима (поз. 1), комора за увођење и одвођење (поз. 2) и скретање процесног/енергетског флуида (поз. 3). На одговарајућим местима на коморама постављају се прикључци за пражњење и одвадушење, а на цевним прикључцима и прикључци за мерне инструменте за мерење величина стања радних флуида, као што су притисак, односно температура.

Струјање ваздуха се остварује помоћу вентилатора (поз. 4), који се покреће електромотором са редуктором (поз. 5). У односу на смер струјања ваздуха вентилатори се постављају испред цевог снопца уколико треба да обезбеде потисно струјање ваздуха, односно иза снопца ако је у питању усисно струјање. Између цевог снопца и вентилатора се поставља комора за дистрибуцију ваздуха (поз. 6). Ослоњци апарата (поз. 7) се постављају испод комора, при чему је један од

ослонаца покретан и дозвољава растерећење услед напрезања изазваних топлотним дилатацијама делова апарата, [5].

Потисне вентилаторе у односу на усисне карактерише мањи запремински проток ваздуха за хлађење и мања снага. Такође, приликом потисног струјања ваздуха преко цевног снопа знатно је израженија турбуленција у односу на усисно струјање чиме се повећава вредност коефицијента прелаза топлоте. Са друге стране, горњи ред оребрених цеви код ваздушних хладњака са потисним струјањем је изложен атмосфери, при чему постоји опасност од оштећења услед кише, града, и сл. У топлијим климатским областима горњи ред оребрених цеви се греје услед сунчевог зрачења чиме се ваздушни хладњак додатно оптерећује.

Постављањем усисног вентилатора изнад цевног снопа оребрених цеви спречавају се поменути штетни ефекти. Такође, усисни вентилатори су мање бучни од потисних и мање су осетљиви на рецикулацију ваздуха до које може доћи услед ветра или непосредне близине високих објеката.

2.1.1.2 Цеви и цевни сноп

Избор материјала цеви размењивача топлоте са ваздушним хлађењем зависи од његове намене. Најчешће се користи угљенични челик, а у зависности од степена агресивности процесног флуида основна цев се може израдити и од других материјала (бакар, легирани челици, итд.).

Распоред цеви у цевном снопу је најчешће троугласти (по теменима једнакостраничног троугла). Пречник цеви (d_s (m)) се креће у границама од 10 mm (за расхладне уређаје са фреоном), па до 50 mm (у петрохемијској индустрији), а најчешће се користе цеви са спољашњим пречником од 25 mm. Уобичајени опсег геометријских параметара оребрених цеви за ову врсту апарата, према [1], [2], [4], [5] је следећи:

- висина ребара: $h_r = (0,4 \div 0,75) \cdot d_s$;
- број ребара по јединици дужине цеви: $N_r = 275 \div 625 \text{ m}^{-1}$;
- дебљина ребра: $\delta_r = 0,3 \div 0,5 \text{ mm}$;
- корак цеви (подужни и попречни): $(2 \div 2,75) \cdot d_s$;
- однос укупне површине са спољашње стране цеви и површине исте цеви када не би имала ребра (коефицијент оребравања) се обично креће до 25.

Дужина цеви у цевном снопу се према [2] креће у опсегу од 1 m до 12,2 m. Ширина цевног снопа износи од 1,2 m до 6,1 m, али је овај опсег обично ограничен у интервалу 3,2 – 3,5 m. Број редова цеви у снопу се обично креће од 3 до 8.

Крајеви цеви се израђују без ребара ради остваривања везе између цеви и цевне плоче, која се изводи углавном уваливањем, а за више притиске може се применити поступак заваривања. Да би се избегло механичко оштећење везе цеви и цевне плоче услед сопствене тежине и вибрација цеви, у међуцевни простор се уграђују носеће преграде за цеви.

2.1.1.3 Ребра у ваздушним хладњацима

Због високе вредности топлотне проводности, мале масе и могућности лаког обликовања, ребра се најчешће израђују од алуминијума, али је њихова употреба ограничена на процесе у којима

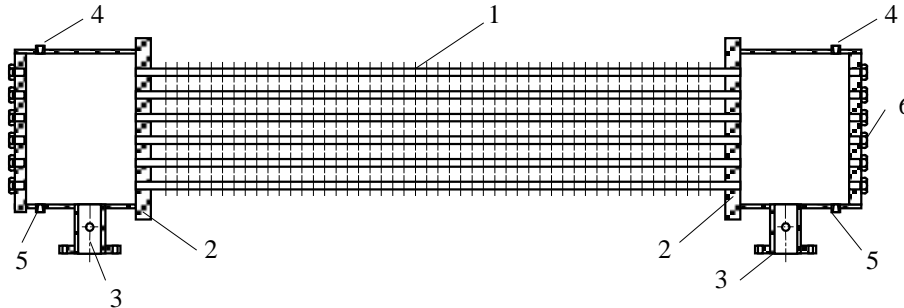
температура процесног флуида не прелази 180°C. Такође, висок садржај SO₂ може да изазове корозију алуминијума, па се у тим случајевима препоручује употреба ребара од угљеничног челика.

2.1.1.4 Коморе за увођење, одвођење и скретање топлијег флуида

Коморе за увођење, одвођење и скретање процесног флуида се налазе на крајевима цевног снопа и користе се за дистрибуцију процесног флуида из цевовода у цеви размењивача. Најчешће су призматичног облика са равним површинама, али при вишем притиску процесног флуида могу бити и другог облика. Коморе се обично израђују од угљеничног или нерђајућег челика, али по потреби се користе и материјали са већом отпорношћу на корозију, и са цевном плочом могу бити спојене са растављивим или нерастављивим везама.

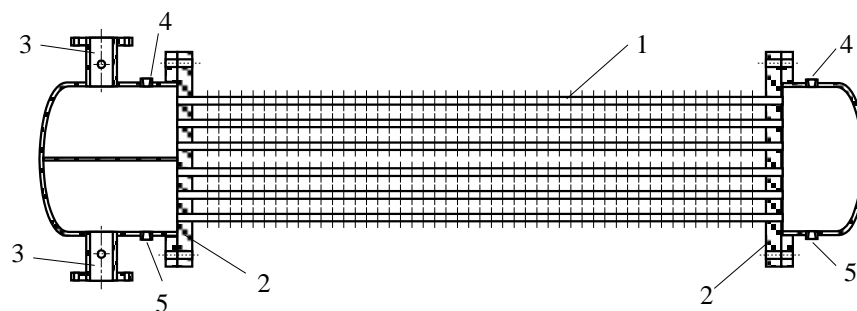
На сликама 2.4 до 2.7 се налазе најчешће примењиване конструкције са следећим позицијама елемената размењивача: 1-цевни сноп, 2-цевна плоча, 3-прикључци за улаз и излаз радног флуида, 4-прикључак за одваздушење, 5-прикључак за пражњење, 6-прикључак за механичко чишћење унутрашње површине цеви.

На слици 2.4 приказана је конструкција код које се сви спојеви коморе остварују заваривањем. С обзиром да је цена ових апарата нижа у односу на остале типове конструкција веома често се користе у индустрији. Са спољашње стране поклопца се налазе завртњи чији је пречник обично 1 mm већи од пречника цеви и кроз које се могу провући уређаји за механичко чишћење апарата. Оваква конструкција се користи за притиске до 300 bar.



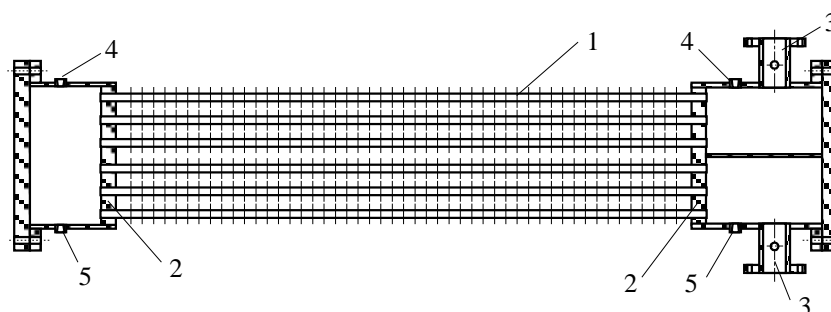
Слика 2.4 Размењивач топлоте са ваздушним хлађењем са завареном конструкцијом коморе за процесни флуид

На слици 2.5 приказан је уређај са раздвојивим коморама чијим се скидањем може приступити цевима и цевним плочама ради чишћења и поправки. При монтажи је неопходно водити рачуна да се правилно поставе заптивачи између комора и цевних плоча. Проблем који се јавља при демонтажи је неопходност раздвајања веза прикључака апарата са цевоводима процесног флуида.



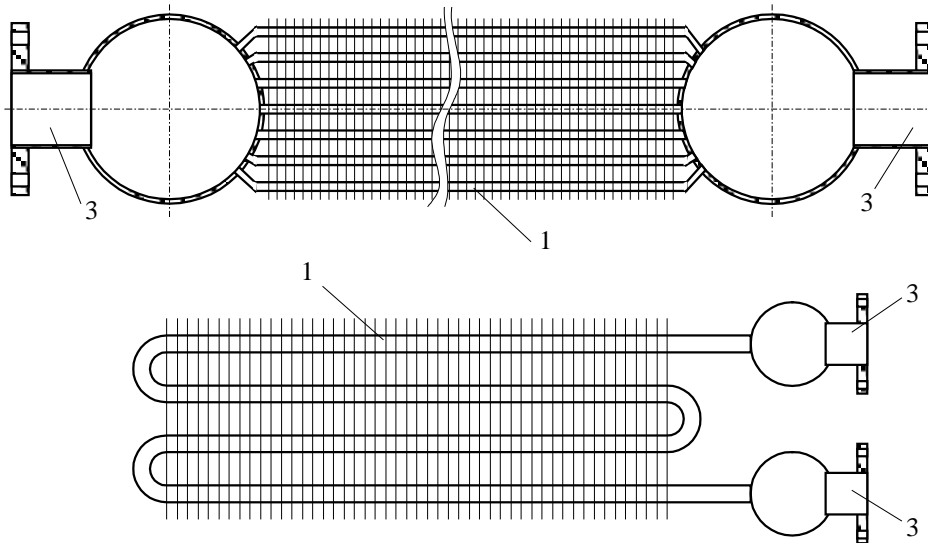
Слика 2.5 Размењивач топлоте са ваздушним хлађењем са раздвојивим коморама

На слици 2.6 је приказана конструкција са раздвојивим поклопцем. Овим конструкционим решењем се при демонтажи апарата не мора извршити раздвајање цевовода процесног флуида и прикључака. За потребе чишћења цевних плоча и цеви размењивача потребно је скинути само поклопац комора.



Слика 2.6 Размењивач топлоте са ваздушним хлађењем са раздвојивим поклопцима

На слици 2.7 је приказан апарат код кога је комора за увођење процесног флуида израђена од цевних сегмената. Овај тип конструкционог решења се примењује у процесима код којих се не очекује интензивно запрљање унутрашњих зидова цеви. Спајањем правих цеви помоћу U – цевних лукова може се повећати број пролаза топлијег флуида кроз цеви размењивача. С обзиром да се оребрене цеви и коморе заварују, ови уређаји издржавају веома високе притиске, али не постоји могућност механичког чишћења апарата.



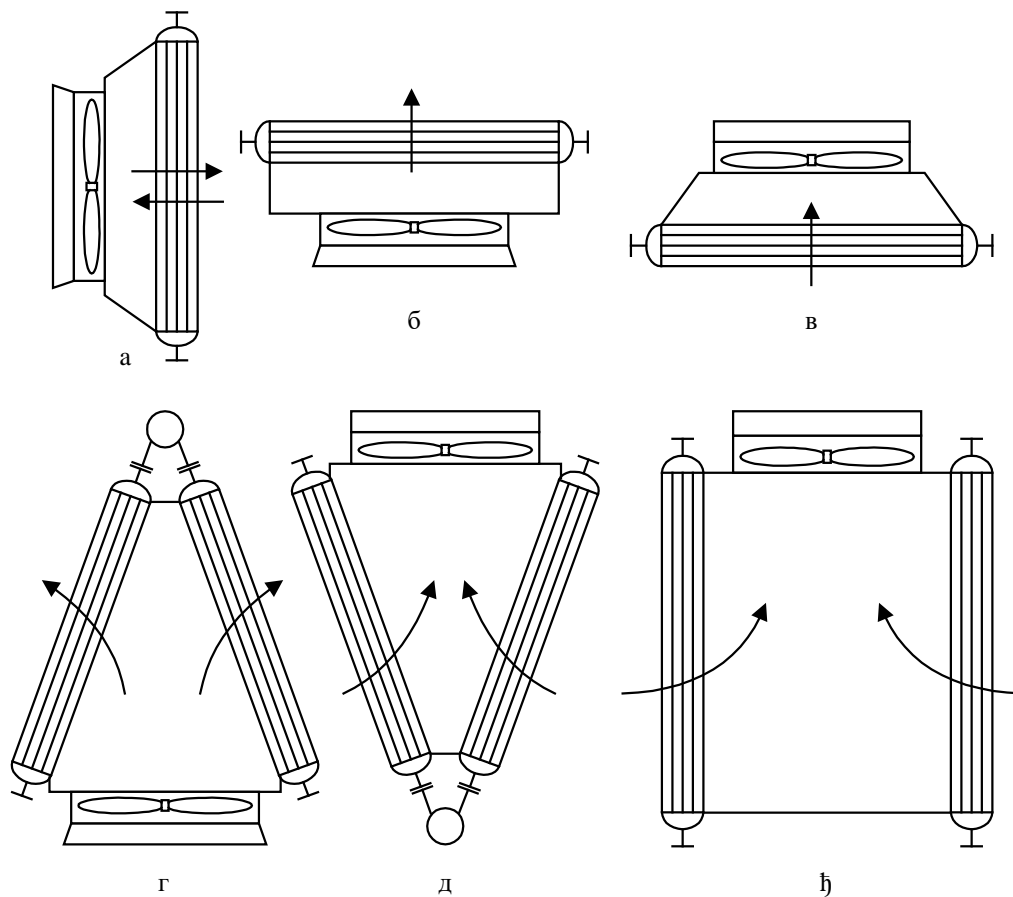
Слика 2.7 Размењивачи топлоте са ваздушним хлађењем са коморама израђеним од цевних сегмената

2.1.1.5 Начин постављања размењивача топлоте са ваздушним хлађењем

Цевни сноп размењивача топлоте са ваздушним хлађењем се може поставити хоризонтално, вертикално или под углом. Уобичајено је хоризонтално постављање. Значајно смањење потребне површине за смештај размењивача се постиже вертикалним постављањем, али тада је значајан утицај ветра на топлотне перформансе апарата. Вертикална монтажа се углавном користи за ваздушне хладњаке малих димензија. Компромис којим се смањује потребна површина за монтажу уз прихватљив утицај ветра на перформансе апарата је постављање цевног снопа под углом, обично у опсегу од $45^\circ - 60^\circ$. На слици 2.8 су приказани основни начини постављања цевног снопа и вентилатора, односно уградње размењивача топлоте са ваздушним хлађењем (стрелице представљају смер струјања ваздуха) и то:

- а - вертикални, који може бити потисни или усисни;
- б – хоризонтални потисни;
- в – хоризонтални усисни;
- г - потисни са косо постављеним грејним површинама (тзв. А-тип);
- д - усисни са косо постављеним грејним површинама (тзв. В-тип);
- ђ - усисни са два вертикална цевна снопа.

Треба напоменути да постоји и низ других решења, која се ређе примењују.



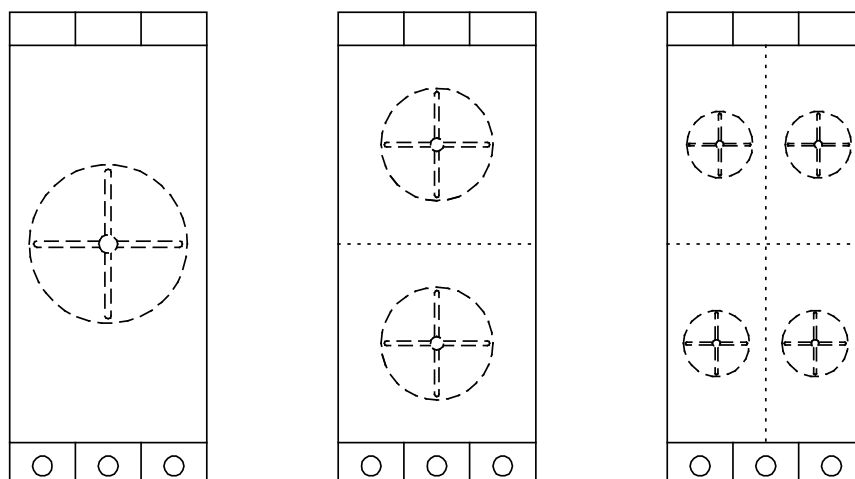
Слика 2.8 Основни начини постављања цевног снопа и вентилатора

2.1.1.6 Вентилатори за ваздушне хладњаке

За струјање ваздуха преко оребрених цеви ваздушних хладњака углавном се користе аксијални вентилатори, док се код мањих ваздушних хладњака користе и центрифугални вентилатори.

У зависности од димензија размењивача топлоте са ваздушним хлађењем може се користити један вентилатор (за размењиваче мањих димензија) или већи (најчешће паран) број вентилатора, који раде у паралелној вези, како је приказано на слици 2.9. Већи број вентилатора се користи да би се обезбедила равномерна дистрибуција ваздуха преко цевног снопа. Такође, ако један од вентилатора испадне из погона услед квара, размењивач топлоте може да ради са преосталим вентилаторима са смањеним расхладним учинком.

Проблем који се јавља код размењивача топлоте са ваздушним хлађењем је неравномерна дистрибуције ваздуха преко оребрених цеви, а овај проблем је знатно израженији код размењивача топлоте са потисним струјањем. Због тога је неопходно посветити додатну пажњу овом проблему.



Слика 2.9 Ваздушни хладњак са једним или више вентилатора

Препоручени односи геометријских величина размењивача, који треба да обезбеде равномерну дистрибуцију ваздуха, су дати у табели 2.1, односно на слици 2.10, при чему су коришћене следеће ознаке [5]:

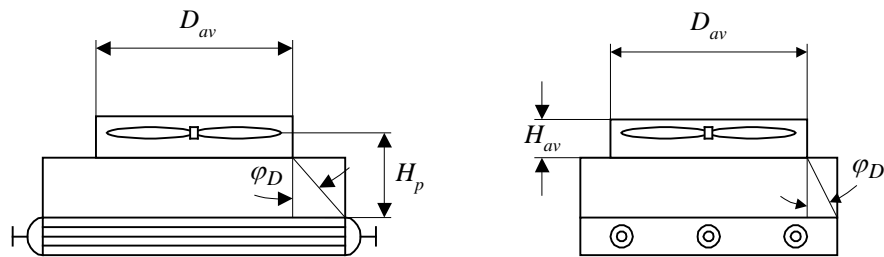
- A (m^2), површина попречног пресека апарата;
- A_{av} (m^2), површина попречног пресека канала вентилатора

$$A_{av} = \frac{\pi \cdot D_{av}^2}{4} \quad (2.1)$$

- D_{av} (m), пречник канала вентилатора;
- H_{av} (m), дужина канала вентилатора;
- H_p (m), растојање од осе вентилатора до цевног снопа;
- ϕ_D ($^\circ$), угао дисперзије ваздушне струје.

Табела 2.1 Препоручени геометријски односи и величине везани за избор и постављање аксијалних вентилатора

	Потисно струјање	Усисно струјање
A_{av} / A	0,4	0,3
H_p / D_{av}	0,5	0,3
H_{av} / D_{av}	0,16	0,16
$\phi_D, ^\circ$	45	45



Слика 2.10 Геометријске величине везане за постављање аксијалних вентилатора

Аксијални вентилатори, који се примењују у размењивачима са ваздушним хлађењем, обично су пречника $0,3 \div 5$ m, са 3 до 10 лопатица. Лопатице вентилатора се израђују превасходно од алуминијума, али и од угљеничних и легираних челика, пластичних материјала и различитих легура.

За погон аксијалних вентилатора се најчешће користе електромотори, али се могу користити и мотори са унутрашњим сагоревањем, парне турбине, итд. Веза између вентилатора и погонског уређаја се може остварити на више начина [2]:

- директном везом електромотора и вентилатора (примењује се за пречнике вентилатора мање од 1,5 m);
- каишним преносом, који се користи за електромоторе снаге до 30 kW и пречнике до 3 m;
- помоћу редуктора ако је снага електромотора већа од 30 kW и када је пречник вентилатора већи од 3 m, као и при коришћењу парне турбине као погонске машине.

Снага погонског мотора вентилатора зависи од стања околног ваздуха. Због ниске спољашње температуре, зимски околни ваздух је веће густине. С обзиром да вентилатор остварује константан запремински проток, у зимским условима је повећана потрошња енергије погонског мотора вентилатора. Из тог разлога се у [2] препоручује да се прорачунска снага погонског мотора увећа за $25 \div 30\%$.

Зазор између лопатица вентилатора и оплоте за пречнике вентилатора од $2 \div 4$ m треба да износи максимално 0,5% од пречника вентилатора. Према [6] зазор не треба да је мањи од 9 mm, и не треба да је већи од 19 mm.

Уколико је познат проток ваздуха кроз размењивач топлоте, може се одабрати брзина ваздуха на основу које ће се одредити површина попречног пресека ваздушног хладњака. Препоручени опсег брзине сведене на укупну површину попречног пресека (без присуства оребрених цеви) према [7] износи 1,5 – 4 m/s. Препоручена брзина ваздуха у најужем струјном пресеку цевног снопа према [6] и [8] износи од 5 – 7 m/s.

2.1.1.7 Прорачунска температура код ваздушних хладњака

С обзиром да површина размењивача топлоте са ваздушним хлађењем зависи од температурске разлике, температура околног ваздуха, поред шеме струјања флуида, има велики утицај на рад размењивача, односно на средњу температурску разлику. Вредност спољне температуре у току године може значајно да варира. За прорачунску вредност спољашње температуре се не усваја максимална температура на посматраној локацији, већ се, према [2], усваја вредност која се јавља

у $4 \div 6\%$ експлоатационог периода у току године. Оваквим избором се прорачунска температура на улазу у апарат снижава за $12 \div 14^\circ\text{C}$, а инвестициони трошкови се смањују чак за $50 \div 60\%$.

Да би прецизно могла да се одреди прорачунска спољашња температура потребно је познавати криву годишње промене температуре, криву дневне промене температуре и криву учесталости јављања максималне температуре по сувом термометру.

Постоји неколико различитих процедура у доступној литератури које се могу користити за одређивање прорачунске температуре када за дату локацију нису доступни прецизни метеоролошки подаци. Једна од таквих процедура је описана у [9]. Прво је потребно проценити вредност коефицијента пролаза топлоте на основу топлијег флуида и његовог температурског опсега. Оријентационе вредности коефицијената пролаза топлоте за размењиваче топлоте са ваздушним хлађењем су дате у [9]. Затим се израчунава пораст температуре ваздуха на основу следеће емпиријске формуле

$$t_{2k} - t_{1p} = 0.005 \cdot k \cdot \left(\frac{t_{1p} + t_{1k}}{2} - t_{2p} \right) \quad (2.2)$$

где су:

- t_{1p}, t_{1k} ($^\circ\text{C}$), температуре топлијег флуида на улазу у размењивач топлоте, односно на излазу размењивача топлоте;
- t_{2p}, t_{2k} ($^\circ\text{C}$), почетна, односно крајња температура ваздуха;
- k ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$), коефицијент пролаза топлоте.

Процена пројектне температуре је заснована на глатким (неоребреним цевима).

Још једна једноставна релација која се често користи за процену прорачунске температуре околног ваздуха је дата у [10], и гласи

$$t_{2p} = t_{v, sr} + \frac{t_{v, max}}{8} \quad (2.3)$$

где су:

- $t_{v, sr}$ ($^\circ\text{C}$), средња температура у току најтоплијег месеца у години за последњих десет година;
- $t_{v, max}$ ($^\circ\text{C}$), максимална температура ваздуха за последњих десет година.

За нашу земљу је уобичајено да прорачунска температура износи између 30°C и 35°C .

Температура ваздуха на излазу из апарата је условљена температуром топлијег флуида на излазу из апарата. Према [6] се препоручује да минимална разлика температуре топлијег флуида на излазу и ваздуха на излазу из апарата буде већа од $8 \div 14^\circ\text{C}$.

У случајевима када вредност температуре околног ваздуха има вишу вредност од усвојене прорачунске температуре, топлотна снага размењивача је нижа у односу на пројектовану. У том случају пројектована топлотна снага апарата се може достићи квашењем цевног снопа водом, при чему се услед испаравања воде са цевног снопа повећава могућност хлађења процесног

(енергетског) флуида. У одређеним случајевима се може уградити комора за припрему ваздуха у којој се убризгавањем воде врши влажење околног ваздуха, чиме се снижава температура ваздуха на улазу у апарат.

У зимским условима рада, при ниским спољашњим температурама, постоји опасност од смрзавања процесног (енергетског) флуида. Решења која се најчешће примењују у тим случајевима су:

- рецикулација дела загрејаног ваздуха преко цевног снопа;
- уградња парних загрејача чији је задатак да предгревањем припреме ваздух на потребне параметре на улазу у ваздушни хладњак;
- уградња контролног уређаја који омогућава да део ваздуха обилазним водом заобиђе размењивач;
- у одређеним случајевима, контрола температуре флуида на излазу из размењивача се може вршити променом протока ваздуха кроз вентилатор – двобрзински погон вентилатора, фреквентно регулисани вентилатор или променљиви угао лопатица вентилатора.

2.1.2 Размењивачи топлоте са оребреним цевима смештени у канале

Размењивачи топлоте са оребреним цевима који се смештају у канале се користе у различите сврхе, а неки од примера где је могућа примена ових апарата су:

- загревање и хлађење процесних и енергетских флуида (нпр. загревање воде, или ваздуха за технолошке потребе помоћу врелих гасова из индустријских пећи);
- загревање ваздуха за потребе грејања просторија његовим наструјавањем преко снопа оребрених цеви кроз које струји врела вода или водена пара (тзв. калорифери);
- загревање ваздуха за сушаре (енергетски флуид је топла вода, врела вода или водена пара);
- рекулација топлоте из продуката сагоревања, при чему се рекулацирана топлота даље користи за испаравање воде или загревање ваздуха за сагоревање у котловима;
- припрема ваздуха за различите намене (нпр. хлађење атмосферског ваздуха са одвођењем влаге, а затим његово загревање за потребе складишта лако кварљивих производа).

Код размењивача смештених у каналима се, за разлику од ваздушних хладњака код којих се скоро искључиво примењује троугласти распоред цеви, веома често користи и квадратни распоред цеви. У зависности од примене, носеће цеви, ребра и коморе за увођење и одвођење радних флуида се израђују у широком опсегу облика, димензија и од различитих материјала. Код ових апарата се веома често користе ламеласти ребра. Уколико се ови апарати користе за кондензацију процесног/енергетског флуида, поред вертикалних користе се и хоризонтално постављене цеви. Такође, уколико процесни/енергетски флуид у цевима испарава (нпр. расхладни флуид, вода, итд.) апарат се може изградити са природном или принудном циркулацијом течности.

Када се размењивачи топлоте са оребреним цевима који се смештају у канале користе као рекулатори топлоте, при хлађењу продуката сагоревања из индустријских пећи мора се водити рачуна о појави нискотемпературске корозије. Нискотемпературска корозија се јавља када гас садржи водену пару и оксиде сумпора, а када је температура зида цеви на хладнијем крају апарата нижа од температуре тачке росе овакве гасно-парне мешавине. Приликом кондензације гасно парне мешавине из продуката сагоревања, може доћи до формирања воденог раствора сумпорне киселине који је изузетно агресиван према већини материјала који се користе за израду

размењивача топлоте и струјних канала. Да би се избегле нежељене последице поменуте појаве неопходно је пажљиво проучити састав гасно-парне мешавине и услове стварања кондензата, као и шему струјања радних флуида и њен утицај на температуру зида. Приликом пројектовања постројења и уградње апарата потребно је применити систем аутоматског регулисања, који може искључити размењивач топлоте из система, односно прекинути протицање хладнијег флуида у критичном радном режиму. Једно од решења је и преусмеравање струје продуката сагоревања обилазним водом око рекуператора топлоте.

3 РАЗМЕНА ТОПЛОТЕ И ПАД ПРИТИСКА КОД РАЗМЕЊИВАЧА ТОПЛОТЕ СА ОРЕБРЕНИМ ЦЕВИМА

Као основа за прорачунавање коефицијента прелаза топлоте и коефицијента отпора струјању код размењивача топлоте са оребреним цевима се користи теорија сличности. У овом поглављу ће бити приказан краћи опис теорије сличности, на бази [11] као и основни постулат аналогije транспорта количине кретања и преноса топлоте, такође према [11].

3.1 Теорија сличности

Теорија сличности се примењује у природним наукама и инжењерским дисциплинама ради решавања одређених конкретних проблема и уопштавања резултата мерења. Једноставни примери теорије сличности су добро познати, као нпр. сличност троуглова која се може искористити ради одређивања карактеристичних димензија објеката без непосредног мерења дужина (нпр. одређивање висине зграда, одређивање ширине реке, итд.). Теорија сличности је нашла широку примену при решавању инжењерских проблема везаних за струјање флуида и транспорт топлоте и супстанције. Основа теорије сличности се састоји у могућности да се за конкретан проблем нађе решење на бази постојећих сазнања проверених у пракси.

3.1.1 Сличност физичких појава

Процеси који се одвијају у физички сличним објектима и који имају исту физичку природу су слични и припадају истој класи појаве. Припадност физичке појаве једној класи означава да се механизам ових појава описује једначинама или системима једначина које су идентичне по форми и садржају. У том смислу се може говорити о сличности кретања, струјања, размене топлоте, размене супстанције, итд. Постоји неколико захтева који морају бити испуњени да би се могла разматрати сличност физичких појава.

1. Обавезна претпоставка за сличност физичких појава мора бити геометријска сличност система у којима се ове појаве одвијају.
2. При разматрању сличних појава могу се упоређивати истородне физичке величине у одговарајућим тачкама простора и у одговарајућем временском тренутку.

Истородне физичке величине су оне које имају исти физички смисао и димензије.

Одговарајуће тачке простора су тачке у два система који се пореде (тачке a и b) чије координате задовољавају услове геометријске сличности

$$K_l = \frac{z_1^b}{z_1^a} = \frac{z_2^b}{z_2^a} = \frac{z_3^b}{z_3^a} \quad (3.1)$$

Коефицијент K_l се назива коефицијент геометријске сличности.

Одвијање физичке појаве у времену у два система који се упоређују, у општем случају, не мора да буде једнако, али је за сличност појава неопходно да временски интервали τ^a и τ^b мерени од почетка процеса задовољавају једначину

$$K_\tau = \frac{\tau^b}{\tau^a} \quad (3.2)$$

Коефицијент K_τ се назива коефицијент хомохроности. Када је $K_\tau = 1$ појаве се синхронно одигравају.

3. Сличност физичких величина подразумева сличност свих истоимених физичких величина које карактеришу посматране појаве, као и сличност поља тих величина. Слична поља истоимених физичких величина су поља која се једино разликују по размери.

Код сличности физичких појава поред захтева дефинисаних једначинама (3.1) и (3.2) мора бити испуњено и

$$K_u = \frac{u^b}{u^a} \quad (3.3)$$

за било коју физичку величину u . Коефицијент K_u се назива коефицијент сличности.

За коефицијенте сличности су утврђена следећа својства и правила њиховог формирања:

а) Ако је посматрана величина вектор, нпр. брзина \vec{w} , са компонентама w_{z_1} , w_{z_2} и w_{z_3} онда мора бити испуњено

$$K_w = \frac{\vec{w}^b}{\vec{w}^a} = \frac{w_{z_1}^b}{w_{z_1}^a} = \frac{w_{z_2}^b}{w_{z_2}^a} = \frac{w_{z_3}^b}{w_{z_3}^a} \quad (3.4)$$

Ако се формирају разлике величине u_i у два посматрана система онда важи

$$K_u = \frac{u^b}{u^a} = \frac{\Delta u^b}{\Delta u^a} = \frac{du^b}{du^a} \quad (3.5)$$

б) При одређеним процесима уместо физичких величина могу се посматрати и њихове промене у односу на друге величине (време, координата, итд.). За промену $\partial u / \partial z$ за два посматрана система ће бити $\partial u^a / \partial z^a$ и $\partial u^b / \partial z^b$, па ако постоје коефицијенти сличности:

$$K_u = \frac{u^b}{u^a} \quad (3.6)$$

и

$$K_l = \frac{z^b}{z^a} \quad (3.7)$$

онда је веза између ова два диференцијала

$$\frac{\partial u^b}{\partial z^b} = \frac{K_u}{K_l} \cdot \frac{\partial u^a}{\partial z^a} \quad (3.8)$$

За други извод ће важити

$$\frac{\partial^2 u^b}{(\partial z^b)^2} = \frac{K_u}{K_l^2} \cdot \frac{\partial^2 u^a}{(\partial z^a)^2} \quad (3.9)$$

Нека се једна класа појава описује једначином општег облика

$$F(u_1; u_2; \dots; u_n) = 0 \quad (3.10)$$

где су u_1, u_2, \dots, u_n физичке величине помоћу којих се описује посматрана класа појава (брзина, време, температура, густина, концентрација, итд.).

За две сличне појаве у оквиру једне класе појава, могу се формирати два система једначина

$$\left. \begin{aligned} F(u_1^a; u_2^a; \dots; u_n^a) &= 0 \\ F(u_1^b; u_2^b; \dots; u_n^b) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.11)$$

Сличност две физичке величине се дефинише преко коефицијената сличности

$$K_{u_i} = \frac{u_i^b}{u_i^a} \text{ за } i = 1; 2; \dots; n \quad (3.12)$$

што значи да се коефицијенти сличности не могу бирати произвољно, већ између њих мора да постоји једнозначно утврђена веза. Користећи израз (3.12) систем једначина (3.11) се може записати у облику:

$$\left. \begin{aligned} F(u_1^a; u_2^a; \dots; u_n^a) &= 0 \\ F(K_{u_1} \cdot u_1^a; K_{u_2} \cdot u_2^a; \dots; K_{u_n} \cdot u_n^a) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.13)$$

при чему се функционална веза између коефицијената сличности утврђује за сваки постављени систем једначина посебно.

3.1.2 Теореме теорије сличности

Теорија сличности се директно примењује на резултате експеримената ради њиховог уопштавања. При обављању експеримента потребно је знати које се величине мере, како се обрађују резултати мерења и на које појаве се добијени резултати могу применити. Основи теорије сличности се базирају на три теореме које дају одговоре на напред постављена питања.

Како је показано, у систему једначина (3.13) коефицијенти сличности се не могу усвајати произвољно. Ако су појаве сличне онда између коефицијената сличности постоје зависности које ограничавају произвољност њиховог избора. Користећи систем једначина (3.13) могу се добити бездимензиони комплекси (бездимензиони бројеви) састављени од величина које карактеришу одређену класу појаве. Ти бездимензиони бројеви се називају критеријуми сличности. Критеријуми сличности имају одређени физички смисао.

Прва теорема теорије сличности: у сличним појавама истоимени критеријуми сличности су једнаки.

Могућност изналажења критеријума сличности на основу диференцијалних једначина има посебну важност у случају када се те једначине не могу решити у затвореном облику.

Друга теорема теорије сличности: интеграл диференцијалне једначине или система диференцијалних једначина може бити изражен у зависности од критеријума сличности који се на основу њих добијају.

У резултату интеграције диференцијалних једначина се не могу појављивати нови (допунски) критеријуми сличности и не могу нестати „стари“ добијени на основу диференцијалних једначина.

Трећа теорема теорије сличности: сличне су појаве код којих је испуњено да:

- имају једнаку физичку природу;
- се одвијају у геометријски сличним системима;
- гранични услови (услови на граници система) су једнаки.

Критеријуми сличности који из ових услова произилазе имају једнаке бројчане вредности.

Експериментално испитивање било какве појаве у циљу њеног уопштавања за одређену класу појаве мора бити извршено на основу ставова који произилазе из теорема теорије сличности:

1. у складу са првом теоремом у експерименту се одређују све величине које су садржане у критеријумима сличности за посматрану појаву;
2. на основу друге теореме резултати експеримента се приказују преко критеријума сличности, а зависност између њих се даје у облику критеријалних једначина;
3. сагласно трећој теореме могуће је уопштавање добијених критеријалних једначина за све појаве које су сличне испитаним, односно за све појаве које припадају истој класи.

3.1.3 Критеријуми сличности и критеријалне једначине при транспорту количине кретања

Геометријска сличност система који се разматрају подразумева сличне услове на граници система у оквиру кога се одвија струјање. Она је значајна не само за транспорт количине кретања, већ и за транспорт топлоте и супстанције.

Поред геометријске сличности неопходан услов да би се две појаве у два система сматрале сличним је кинематска сличност, која подразумева сличност просторне струјне слике (сличност брзина и убрзања). Да би постојала кинематска сличност мора постојати и динамичка сличност која подразумева сличност сила које узрокују струјање флуида (назива се и флуидодинамичка сличност).

Једначине струјања вискозног нестишљивог флуида у пољу конзервативних сила при ламинарном току у Декартовом координатном систему (осе z_1, z_2, z_3) гласе

$$\frac{Dw_{z_i}}{d\tau} = -g_{z_i} - \frac{1}{\tilde{\rho}} \cdot \frac{\partial p}{\partial z_i} + \nu \cdot \left(\frac{\partial^2 w_{z_i}}{\partial z_1^2} + \frac{\partial^2 w_{z_i}}{\partial z_2^2} + \frac{\partial^2 w_{z_i}}{\partial z_3^2} \right) \quad (3.14)$$

за $i = 1, 2, 3$, где су:

- w_{z_i} (m/s), компоненте вектора брзине у правцу осе z_i ;
- p (Pa), статички притисак.

Флуидодинамичко стање у систему се допуњује једначином континуитета која у општем облику гласи

$$\frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial \tau} + \frac{\partial(\tilde{\rho} \cdot w_{z_1})}{\partial z_1} + \frac{\partial(\tilde{\rho} \cdot w_{z_2})}{\partial z_2} + \frac{\partial(\tilde{\rho} \cdot w_{z_3})}{\partial z_3} = 0 \quad (3.15)$$

С обзиром да се у инжењерској пракси јавља случај ламинарног протицања флуида у пољу земљине теже биће $g_{z_1} = g_{z_2} = 0$ и $g_{z_3} = g = 9,81 \text{ m/s}^2$ (убрзање земљине теже). Једначина континуитета у овом случају гласи

$$\frac{\partial w_{z_1}}{\partial z_1} + \frac{\partial w_{z_2}}{\partial z_2} + \frac{\partial w_{z_3}}{\partial z_3} = 0 \quad (3.16)$$

Једначина струјања флуида (Навије-Стоксове једначине) за појаве a и b гласе:

$$\frac{Dw_{z_i}^a}{d\tau^a} = -g_{z_i}^a - \frac{1}{\tilde{\rho}^a} \cdot \frac{\partial p^a}{\partial z_i^a} + \nu^a \cdot \left[\frac{\partial^2 w_{z_i}^a}{(\partial z_1^a)^2} + \frac{\partial^2 w_{z_i}^a}{(\partial z_2^a)^2} + \frac{\partial^2 w_{z_i}^a}{(\partial z_3^a)^2} \right] \quad (3.17)$$

$$\frac{Dw_{z_i}^b}{d\tau^b} = -g_{z_i}^b - \frac{1}{\tilde{\rho}^b} \cdot \frac{\partial p^b}{\partial z_i^b} + \nu^b \cdot \left[\frac{\partial^2 w_{z_i}^b}{(\partial z_1^b)^2} + \frac{\partial^2 w_{z_i}^b}{(\partial z_2^b)^2} + \frac{\partial^2 w_{z_i}^b}{(\partial z_3^b)^2} \right] \quad (3.18)$$

Уводећи одговарајуће коефицијенте сличности за појаве a и b у облику:

$$K_l = \frac{z_i^b}{z_i^a} \quad (3.19)$$

$$K_w = \frac{\bar{w}^b}{\bar{w}^a} = \frac{w_{z_i}^b}{w_{z_i}^a} \quad (3.20)$$

$$K_\tau = \frac{\tau^b}{\tau^a} \quad (3.21)$$

$$K_{\tilde{\rho}} = \frac{\tilde{\rho}^b}{\tilde{\rho}^a} \quad (3.22)$$

$$K_p = \frac{p^b}{p^a} \quad (3.23)$$

$$K_g = \frac{g_{z_i}^b}{g_{z_i}^a} \quad (3.24)$$

$$K_\nu = \frac{\nu^b}{\nu^a} \quad (3.25)$$

добеће се Навије-Стоксова једначина за појаву b

$$\begin{aligned} & \frac{K_w}{K_\tau} \cdot \frac{\partial w_{z_i}^a}{\partial \tau^a} + \frac{K_w^2}{K_l} \cdot \left[\frac{\partial w_{z_i}^a}{\partial z_1^a} \cdot w_{z_1}^a + \frac{\partial w_{z_i}^a}{\partial z_2^a} \cdot w_{z_2}^a + \frac{\partial w_{z_i}^a}{\partial z_3^a} \cdot w_{z_3}^a \right] = \\ & = -K_g \cdot g_{z_i}^a - \frac{K_p}{K_{\tilde{\rho}} \cdot K_l} \cdot \frac{1}{\tilde{\rho}^a} \cdot \frac{\partial p^a}{\partial z_i^a} + \frac{K_\nu \cdot K_w}{K_l^2} \cdot \nu^a \cdot \left[\frac{\partial^2 w_{z_i}^a}{(\partial z_1^a)^2} + \frac{\partial^2 w_{z_i}^a}{(\partial z_2^a)^2} + \frac{\partial^2 w_{z_i}^a}{(\partial z_3^a)^2} \right] \end{aligned} \quad (3.26)$$

Да би описане појаве припадале истој класи очигледно је да константе у овој парцијалној диференцијалној једначини морају бити међусобно једнаке, тј

$$\frac{K_w}{K_\tau} = \frac{K_w^2}{K_l} = K^g = \frac{K_p}{K_{\tilde{\rho}} \cdot K_l} = \frac{K_v \cdot K_w}{K_l^2} \quad (3.27)$$

За потребе ове дисертације су од интереса следећи критеријални бројеви који следе из (3.26):

- Фрудов број који дефинише однос између инерцијалних сила у систему и силе земљине теже

$$Fr = \frac{(w^a)^2}{g^a \cdot l^a} = \frac{(w^b)^2}{g^b \cdot l^b} = \frac{w^2}{g \cdot l} = const \quad (3.28)$$

- Ојлеров број који дефинише однос између промене статичког притиска (тј. отпора струјању флуида у систему) и динамичког притиска

$$Eu = \frac{\Delta p^a}{\tilde{\rho}^a \cdot (w^a)^2} = \frac{\Delta p^b}{\tilde{\rho}^b \cdot (w^b)^2} = \frac{\Delta p}{\tilde{\rho} \cdot w^2} = const \quad (3.29)$$

- Рејнолдсов број који дефинише однос између инерцијалних сила и сила вискозног трења

$$Re = \frac{w^a \cdot l^a}{\nu^a} = \frac{w^b \cdot l^b}{\nu^b} = \frac{w \cdot l}{\nu} = const \quad (3.30)$$

Следи да у флуидодинамички сличним системима у свакој тачки система критеријуми сличности имају једнаке бројчане вредности, тј. може се дефинисати општа критеријална једначина у облику

$$Eu = Eu(Fr; Re) \quad (3.31)$$

Ова општа зависност важи у случају принудног струјања течности за које се може одредити карактеристична брзина флуида w .

3.1.4 Критеријуми сличности и критеријалне једначине за размену топлоте

Топлотна сличност подразумева слична температурска поља која се јављају само када постоје слични услови размене топлоте у два система (подразумева се да су испуњени и услови геометријске и кинематске сличности).

У случају размене топлоте при струјању флуида температурско поље је функција и брзинског поља, па се за хомоген вискозни нестишљив флуид, занемарујући топлоту трења и постојање топлотног извора (понора), може показати да једначина енергије има облик

$$\frac{DT}{d\tau} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z_1^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z_2^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z_3^2} \right) \quad (3.32)$$

где су:

- T (K), апсолутна температура;
- a (m^2/s), топлотна дифузивност

$$a = \frac{\lambda}{\tilde{\rho} \cdot \tilde{c}_p} \quad (3.33)$$

- \tilde{c}_p (J/(kg · K)), специфични топлотни капацитет;
- λ (W/(m · K)), топлотна проводност.

За анализу процеса размене топлоте при струјању флуида користе се флуидодинамички индикатори сличности, при чему из једначине енергије произилази нови коефицијент сличности (однос коефицијената температурне проводљивости)

$$K_a = \frac{a^b}{a^a} \quad (3.34)$$

Сличност температурских поља се изражава преко коефицијента сличности

$$K_T = \frac{T^b}{T^a} \quad (3.35)$$

На основу једначине енергије следи

$$\frac{K_T}{K_\tau} = \frac{K_w \cdot K_T}{K_l} = \frac{K_a \cdot K_T}{K_l^2} \quad (3.36)$$

па се за потребе ове дисертације може формирати Пеклеов број који представља однос између интензитета конвективног и молекуларног транспорта топлоте

$$Pe = \frac{w \cdot l}{a} = const \quad (3.37)$$

Количник Пеклеовог и Рејнолдсовог броја се зове Прантлов број

$$Pr = \frac{Pe}{Re} = \frac{\nu}{a} = \frac{\mu \cdot \tilde{c}_p}{\lambda} \quad (3.38)$$

На граници фаза прелаз топлоте се описује граничним условом

$$q = -\lambda \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{z=0} = \alpha \cdot \Delta T \quad (3.39)$$

где су:

- α (W/(m² · K)), коефицијент прелаза топлоте;
- ΔT (K), разлика температура флуида на граници фаза и у зони непоремећеног струјања - погонска сила размене топлоте.

Овај гранични услов значи да је количина топлоте која се размењује између флуида и граничне површине једнака количини топлоте која се размени молекуларним путем кроз топлотни гранични слој. Ако се за појаву прелаза топлоте уведе коефицијент сличности коефицијената топлотне проводности

$$K_\lambda = \frac{\lambda^b}{\lambda^a} \quad (3.40)$$

добеће се индикатор сличности

$$\frac{K_\lambda \cdot K_T}{K_l} = K_\alpha \cdot K_T \quad (3.41)$$

за који следи Нуселтов број који карактерише интензитет преноса топлоте на граници између чврстог тела и флуида

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} = const \quad (3.42)$$

С обзиром на евидентну чињеницу да интензитет размењене количине топлоте зависи од струјног и температурског поља у систему може се закључити да за ову појаву важи следећа општа критеријална једначина

$$Nu = Nu[Fr; Re; Pr; (Pe); \dots] \quad (3.43)$$

Често се у литератури уместо Нуселтовог броја користи Стентонов број

$$St = \frac{Nu}{Pe} = \frac{\alpha}{\tilde{c}_p \cdot \tilde{\rho} \cdot w} \quad (3.44)$$

који представља однос између количине топлоте (топлотног флукса) која се размени између флуида и граничне површине и количине топлоте која би се добила ако би флуид променио температуру од оне коју има у зони непоремећеног струјања до оне која влада на граници између фаза.

У англосаксонској литератури се уместо Нуселтовог броја користи тзв. j_H фактор:

$$j_H = St \cdot Pr^{2/3} \quad (3.45)$$

одакле следи зависност:

$$Nu = j_H \cdot Re \cdot Pr^{1/3} \quad (3.46)$$

3.1.5 Аналогија преноса количине кретања и преноса топлоте

На граници фаза тангенцијални напон се описује граничним условом – Њутновим законом вискозног трења

$$\sigma = -\mu \cdot \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)_{z=0} \quad (3.47)$$

где су:

- μ , коефицијент отпора струјању;
- w (m/s), брзина флуида;
- z (m), координата управна на правац струјања флуида.

Једначина (3.47) је по облику слична једначини (3.39) па се поставља питање да ли се може успоставити нека врста релације између коефицијента прелаза топлоте и коефицијента трења. Уколико се оваква веза може успоставити тада би се запажања добијена истраживањем брзинског поља могла директно искористити за предвиђање температурског поља и обратно. Рејнолдсова и Чилтон-Колбурнова аналогија ће овде бити изложене на начин који је преузет из [12].

3.1.6 Рејнолдсова аналогија

Аналогију (сличност) између преноса количине кретања и топлоте је први уочио Osborne Reynolds 1874 године. У овом одељку ће бити показано да се математички слични процеси, који немају исту физичку природу, могу описати сличним (аналогним) математичким изразима. Даље ће се показати да сазнања о једној појави (пренос количине кретања) могу бити коришћена за решавање проблема преноса топлоте (и супстанције).

У случају турбулентног струјања флуида пренос количине кретања се дефинише помоћу турбулентне вискозности [11]

$$\sigma = -(\nu + E_\nu) \cdot \rho \cdot \frac{dw}{dz} \quad (3.48)$$

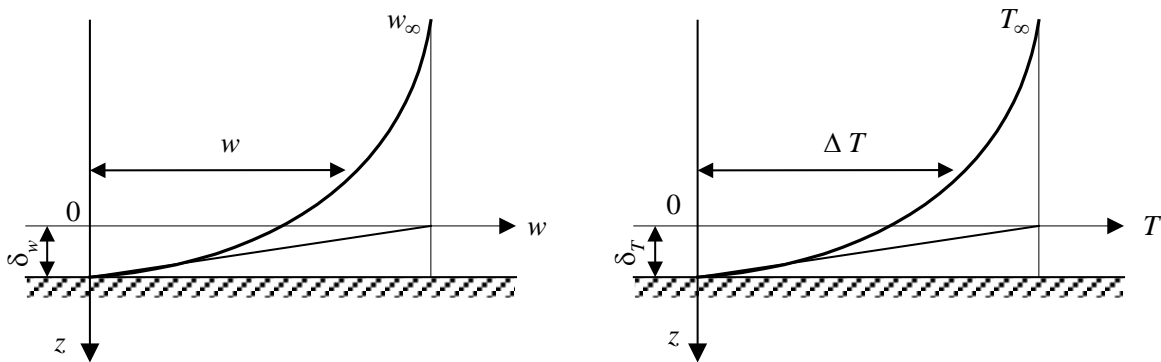
и аналогно са претходним турбулентна топлотна дифузивност се уводи у израз за пренос топлоте

$$\dot{q} = -(a + E_a) \cdot \rho \cdot c_p \cdot \frac{dT}{dz} \quad (3.49)$$

где су:

- σ (N/m^2), тангенцијални напон;
- E_v (m^2/s), турбулентна кинематска вискозност;
- w (m/s), брзина струјања флуида;
- z (m), координата;
- \dot{q} (W/m^2), специфични топлотни флуks;
- E_a (m^2/s), турбулентна топлотна дифузивност;
- c_p ($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$), специфични топлотни капацитет флуида;
- T (K), температура флуида.

На слици 3.1 је приказана промена брзине и температуре у случају струјања флуида преко чврсте граничне површине. Брзина струјања флуида се мења од $w_i = 0$ на граници са чврстим зидом до w_∞ у основној маси флуида (зона непо ремећеног струјања), а температуре од T_i до T_∞ .



Слика 3.1 Промена брзине струјања и температуре у складу са филмском теоријом

Пренос количине кретања и пренос топлоте представљају веома сложен физички феномен. Да би он могао да се опише, развијено је више упрошћених модела чија је заједничка особина претпоставка да се на граници фаза тренутно успоставља стање динамичке равнотеже. Један од таквих модела је филмски модел. Према филмској теорији сви отпори транспорту (количине кретања, топлоте и супстанције) су концентрисани у филму (слоју) флуида одговарајуће дебљине (δ_w и δ_T су дебљине филма које се односе на транспорт количине кретања - ефективна дебљина динамичког слоја и транспорт топлоте - ефективна дебљина температурског слоја). Транспорт кроз филм се обавља молекуларним путем и стварни температурски и брзински профил се замењује упрошћеним профилем, па се једначине (3.48) и (3.49) упрошћавају:

$$\sigma = -\mu \cdot \frac{dw}{dz} \quad (3.50)$$

$$\dot{q} = -\lambda \cdot \frac{dT}{dz} \quad (3.51)$$

У случају преноса количине кретања тангенцијални напон на граници флуид – зид износи

$$\sigma_i = -\mu \cdot \left(\frac{dw}{dz} \right)_{z=\delta_w} \quad (3.52)$$

док је у складу са филмском теоријом (водећи рачуна да је $w_i = 0$) градијент брзине на граници

$$\left(\frac{dw}{dz} \right)_{z=\delta_w} = \frac{w_\infty - 0}{0 - \delta_w} = -\frac{w_\infty}{\delta_w} \quad (3.53)$$

па је коначно

$$\sigma_i = \mu \cdot \frac{w_\infty}{\delta_w} \quad (3.54)$$

У случају преноса топлоте ће бити

$$\dot{q}_i = -\lambda \cdot \left(\frac{dT}{dz} \right)_{z=\delta_T} \quad (3.55)$$

и у складу са филмском теоријом

$$\left(\frac{dT}{dz} \right)_{z=\delta_T} = \frac{T_\infty - T_i}{0 - \delta_T} = -\frac{T_\infty - T_i}{\delta_T} \quad (3.56)$$

па је специфични топлотни флуks на граници флуид – зид

$$\dot{q}_i = \lambda \cdot \frac{T_\infty - T_i}{\delta_T} \quad (3.57)$$

С обзиром да постоји математичка сличност између једначина (3.54) и (3.57) следи да се информације о једном од феномена могу применити на другом феномену ако су услови дефинисани трећом теоремом сличности испуњени (размена се одвија при струјању флуида у геометријски једнаким системима уз аналогне граничне услове).

За аналогiju преноса количине кретања и преноса топлоте се добија

$$\frac{\sigma_i}{\dot{q}_i} = \frac{\mu}{\lambda} \cdot \frac{w_\infty}{T_\infty - T_i} \cdot \frac{\delta_T}{\delta_w} \quad (3.58)$$

У даљем тексту ће се разматрати струјање некомп्रेसибилног флуида кроз глатку цев. Према Вајзбаху пад притиска при струјању флуида износи

$$\Delta p = \xi \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{\rho \cdot w_m^2}{2} \quad (3.59)$$

и он је изазван тангенцијалним напонима на граници флуида и зида

$$\Delta p = \frac{\sigma_i \cdot d \cdot \pi \cdot L}{\frac{d^2 \cdot \pi}{4}} \quad (3.60)$$

па се добија

$$\sigma_i = \frac{\xi}{8} \cdot \rho \cdot w_m^2 \quad (3.61)$$

где су:

- w_m (m/s), средња брзина струјања флуида кроз цев;
- L (m), дужина цеви;
- d (m), унутрашњи пречник цеви;
- ξ , коефицијент трења.

С обзиром да је ефективна дебљина динамичког слоја веома мала у односу на струјни пресек, у случају турбулентног струјања флуида кроз цев, може се сматрати да је испуњено

$$w_m = w_\infty \quad (3.62)$$

па се добија

$$\sigma_i = \frac{\xi}{8} \cdot \rho \cdot w_\infty^2 \quad (3.63)$$

У инжењерској пракси је погодно писати

$$\dot{q}_i = \alpha \cdot (T_\infty - T_i) \quad (3.64)$$

где је α (W/(m² · K)), коефицијент прелаза топлоте.

За аналогију преноса количине кретања и преноса супстанције се добија

$$\frac{\sigma_i}{\dot{q}_i} = \frac{\frac{\xi}{8} \cdot \rho \cdot w_\infty^2}{\alpha \cdot (T_\infty - T_i)} = \frac{\mu}{\lambda} \cdot \frac{w_\infty}{T_\infty - T_i} \cdot \frac{\delta_T}{\delta_w} \quad (3.65)$$

односно у бездимензионом облику

$$\text{Nu} = \frac{\xi}{8} \cdot \text{Re} \cdot \frac{\delta_w}{\delta_T} \quad (3.66)$$

где је

- Nu, Нуселтов број

$$\text{Nu} = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda} \quad (3.67)$$

- Re, Рејнолдсов број

$$\text{Re} = \frac{w_m \cdot d \cdot \rho}{\mu} \quad (3.68)$$

Ако је температура на граници $T_i = \text{const}$ и ако постоји аналогија између ове две појаве мора постојати коефицијент сразмере за ове две математички анологне транспортне појаве:

$$k = \frac{T - T_i}{w} \quad (3.69)$$

а једначине транспорта количине кретања и транспорта топлоте

$$\frac{Dw}{d\tau} = \nu \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \quad (3.70)$$

$$\frac{D(T - T_i)}{d\tau} = a \cdot \frac{\partial^2 (T - T_i)}{\partial z^2} \quad (3.71)$$

морају бити идентичне. Заменом (3.70) се добија

$$\frac{Dw}{d\tau} = \nu \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \quad (3.72)$$

$$k \cdot \frac{Dw}{d\tau} = k \cdot a \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \quad (3.73)$$

што значи да је

$$v = a \quad (3.74)$$

односно, Прантлов број је једнак јединици

$$\text{Pr} = \frac{v}{a} = 1 \quad (3.75)$$

Узимајући у обзир коефицијент сразмере и основна правила теорије сличности

$$k = \frac{\frac{d(T - T_i)}{dz}}{\frac{dw}{dz}} \quad (3.76)$$

односно

$$k = \frac{\left[\frac{d(T - T_i)}{dz} \right]_{z=\delta_T}}{\left[\frac{dw}{dz} \right]_{z=\delta_w}} = \frac{-\frac{T_\infty - T_i}{\delta_T}}{-\frac{w_\infty}{\delta_w}} \quad (3.77)$$

и

$$k = \frac{T_\infty - T_i}{w_\infty} \cdot \frac{\delta_w}{\delta_T} \quad (3.78)$$

одакле следи

$$\frac{\delta_w}{\delta_T} = 1 \quad (3.79)$$

односно

$$\text{Nu} = \frac{\xi}{8} \cdot \text{Re} \quad (3.80)$$

У неким случајевима могуће је користити математичку сличност између појава различите физичке природе и да се на основу познавања једне појаве нека друга довољно поуздано може предвидети. У чланку [13] показано је да је ваљаност Рејнолдсове аналогије повезана са применљивошћу теореме минималне продукције ентропије. Домен у коме Рејнолдсова аналогија није валидна је повезан са феноменом хидродинамички неразвијеног струјања.

3.1.7 Chilton – Colburn аналогија

Chilton и Colburn су у чланку [14] анализирали експерименталне податке који су им били на располагању и закључили су да се за случајеве струјања флуида кроз цеви, струјања преко равне плоче и попречног наструјавања цеви Рејнолдсова аналогија може кориговати у облик

$$\text{Nu} = \frac{\xi}{8} \cdot \text{Re} \cdot \text{Pr}^{1/3} \quad (3.81)$$

чиме су дали значајан доказ постојања аналогије у области ламинарног и турбулентног струјања на бази експерименталних података за гасове и течности.

Последица Chilton – Colburn аналогије је да Прантлов број дефинише однос између ефективне дебљине динамичког ($z_{F,w}$) и температурског филма ($z_{F,T}$)

$$\frac{z_{F,w}}{z_{F,T}} = \text{Pr}^{1/3} \quad (3.82)$$

Поред изложених феномена у скорије време је дато свега још неколико потврда Рејнолдсове, односно Chilton – Colburn аналогије. Нпр. у области ламинарног струјања флуида преко цевног снопа једначине објављене у [15] и [16] показују да се може применити Chilton – Colburn аналогија.

3.2 Геометријске карактеристике размењивача топлоте са завојним ребрима потребне за анализу топлотних перформанси и пада притиска

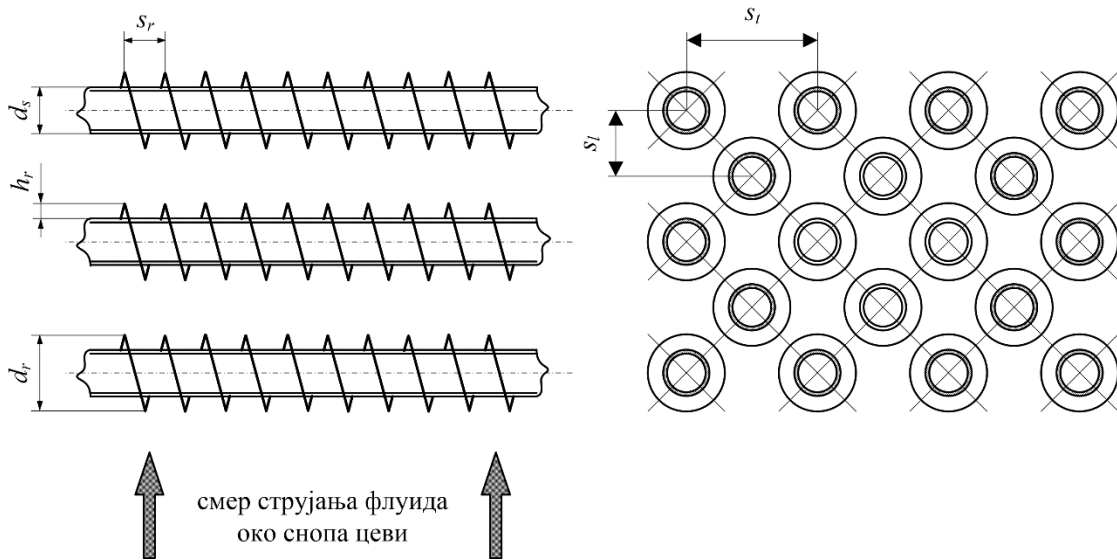
На слици 3.2 дефинисане су основне геометријске карактеристике оребрених цеви.

Коришћене су следеће ознаке:

- d_s (m), спољашњи пречник цеви;
- d_{kr} (m), пречник у корену ребра;
- d_r (m), пречник ребра;
- s_t (m), попречни корак цеви;
- s_l (m), подужни корак цеви;
- s_r (m), корак ребара;
- δ_r (m), дебљина ребра.

Поред наведених величина неопходно је познавати и:

- N_{ct} , број цеви у чеоном реду;
- N_{cl} , број редова цеви;
- N_c , укупан број цеви;
- H (m), висину размењивача топлоте;
- W (m), ширину размењивача топлоте;
- L (m), дужину размењивача топлоте.



Слика 3.2 Распоред цеви и карактеристични геометријски параметри

На основу датих геометријских величина могу се дефинисати следеће изведене величине:

- N_r (m^{-1}), број ребара по јединичној дужини цеви

$$N_r = 1/s_r \quad (3.83)$$

- запреминска порозност (m^3/m^3)

$$\varepsilon = 1 - \frac{\frac{\pi}{4} \cdot [d_s^2 (s_r - \delta_r) + d_r^2 \cdot \delta_r]}{s_t \cdot s_l \cdot s_r} \quad (3.84)$$

- површинска порозност на најужем делу цевног снопа (m^2/m^2)

$$\varepsilon_{pov} = \frac{(s_t - d_s) \cdot (s_r - \delta_r)}{s_t \cdot s_r} \quad (3.85)$$

- специфична површина – површина за размену топлоте сведена на јединицу запремине размењивача

$$s_v = \frac{d_s \cdot (s_r - \delta_r) + \frac{d_r^2 - d_s^2}{2} + d_r \cdot \delta_r}{s_t \cdot s_l \cdot s_r} \quad (3.86)$$

- међуребарна површина цеви

$$S_{mr} = \pi \cdot d_s \cdot L_c \cdot \left(1 - N_l \cdot \delta_r \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{s_r}{\pi \cdot d_s} \right)^2} \right) \quad (3.87)$$

- површина ребара

$$S_r = \pi \cdot N_l \cdot L_c \cdot \left[(d_r - d_s) \cdot \sqrt{\left(\frac{d_r + d_s}{2} \right)^2 + \left(\frac{s_r}{\pi} \right)^2} + \delta_r \cdot \sqrt{d_r^2 + \left(\frac{s_r}{\pi} \right)^2} \right] \quad (3.88)$$

- коефицијент оребрења

$$K_{or} = \frac{s_v}{S_{mr}} \quad (3.89)$$

4 ПРЕГЛЕД ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИХ ПОДАТАКА И ПОСТОЈЕЋИХ КОРЕЛАЦИЈА ИЗ ОТВОРЕНЕ ЛИТЕРАТУРЕ

У даљем тексту је дат преглед доступних експерименталних података из отворене литературе. Преглед је дат хронолошки и обухвата 51 радни режим за пад притиска и 62 режима за прелаз топлоте на цевним размењивачима топлоте са завојним ребрима од 5 различитих група аутора.

4.1 Jameson и Schenectady [17]

Најранији подаци о топлотним и струјним перформансама цевних размењивача топлоте са завојним ребрима су објављени у чланку [17] из 1945. године. Аутори су испитивали утицај подужног корака цеви на пад притиска и на коефицијент прелаза топлоте са ваздушне стране. Еквивалентни пречник оребрене цеви је дефинисан у облику

$$d_{eJS} = \frac{2 \cdot A}{\pi \cdot B} \quad (4.1)$$

где су:

- A (m^2/m), површина оребрене цеви са ваздушне стране сведена на дужни метар цеви,
- B (m/m), обим пројекције цеви на раван паралелну са осом цеви, сведен на дужни метар цеви.

Такође, дефинисан је еквивалентни пречник снопа цеви у облику

$$D_{eJS} = \frac{d_{JS}}{\left[\left(\frac{h_r}{2 \cdot s_l} \right)^{0,4} \cdot \left(\frac{1}{2 \cdot \sqrt{s_l - 1}} + \frac{1}{2 \cdot \sqrt{s_d - 1}} \right) \right]^4} \quad (4.2)$$

где су:

- h_r (m), висина ребра;
- s_l (m), подужни корак ребра;
- s_l (m), попречни корак цеви;
- s_d (m), дијагонално растојање између два узастопна реда цеви.

Аутори су у раду дали корелацију за пад притиска која даје добра слагања са измереним величинама на цевном снопу у ком је попречни корак цеви мањи од дијагоналног растојања између два узастопна реда цеви. Корелација је применљива за просечну температуру ваздуха од 50°C и притисак ваздуха од 1 bar, и има следећу форму

$$\Delta p = 9,56 \cdot 10^{-9} \cdot D_{eJS}^{-0,25} \cdot N \cdot G^{1,75} \quad (4.3)$$

Једначина (4.3) важи за опсег Рејнолдсових бројева 500 – 10000. Рејнолдсов број је дефинисан у следећем облику

$$Re = \frac{G \cdot D_{eJS}}{\mu} \quad (4.4)$$

где су:

- G (kg/(h·m²)), масена брзина;
- μ (Pa·s), динамичка вискозност флуида.

У раду није дата корелација за прелаз топлоте.

Њихове експерименталне податке су обрадили и приказали у форми дијаграма Kays и London у својој књизи [18] из 1955. године, са прерачунатим карактеристичним величинама. С обзиром на немогућност прецизног читавања података о паду притиска и прелазу топлоте из чланка [17], за даљу обраду коришћени су подаци из књиге [18]. Подаци су дати за 10 различитих конфигурација размењивача топлоте чије су геометријске карактеристике приказане у табели 4.1. На слици 4.1 је приказан дијаграм са зависностима Колбурновог фактора и коефицијента трења од Рејнолдсовог броја за размењивач топлоте JS-1, преузет из [18].

Табела 4.1 Геометријске карактеристике размењивача топлоте датих у [18]

Ознака размењивача топлоте	JS-1	JS-2	JS-3	JS-4	JS-5	JS-6	JS-7	JS-8	JS-9	JS-10
d_s (mm)	16,38	16,38	16,38	19,66	19,66	19,66	19,66	19,66	26	26
d_{kr} (mm)	16,89	16,89	16,89	20,27	20,27	20,27	20,27	20,27	26,61	26,61
δ_r (mm)	0,254	0,254	0,254	0,305	0,305	0,305	0,305	0,305	0,305	0,305
d_r (mm)	28,47	28,47	28,47	37,16	37,16	37,16	37,16	37,16	44,12	44,12
s_r (mm)	3,628	2,920	2,920	2,807	2,807	2,807	2,807	2,807	2,886	2,886
s_t (mm)	31,29	31,29	46,93	39,55	50,34	69,21	69,21	50,34	49,76	78,21
s_l (mm)	34,29	34,29	34,29	44,45	44,45	44,45	20,38	34,93	52,40	52,4

Карактеристична брзина струјања је брзина у најужем пресеку размењивача топлоте

$$w_{JS} = \frac{w_{kan}}{\varepsilon_{pov}} \quad (4.4)$$

а карактеристична геометријска дужина је еквивалентни пречник дефинисан као

$$d_{eJS} = \frac{4 \cdot \varepsilon_{pov}}{s_v} \quad (4.5)$$

Брзина струјања флуида сведена на површину попречног пресека размењивача топлоте је дата у облику

$$w_{kan} = \frac{V}{W \cdot H} \quad (4.6)$$

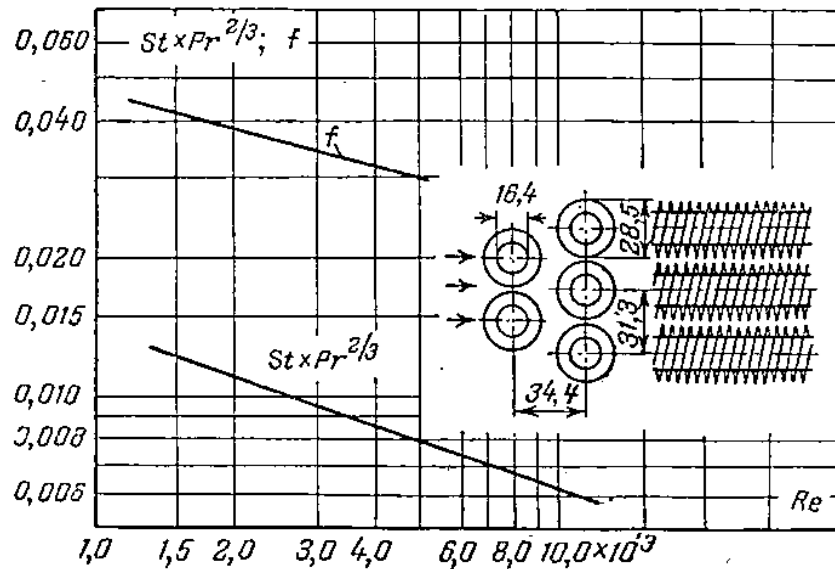
где је V (m^3/s), запремински проток флуида.

Помоћу наведених величина дефинисан је Рејнолдсов број у следећем облику

$$Re_{JS} = \frac{w_{JS} \cdot d_{eJS} \cdot \rho}{\mu} \quad (4.7)$$

и Колбурнов фактор је

$$j_H = St_{JS} \cdot Pr^{2/3} = \frac{Nu_{JS}}{Re_{JS} \cdot Pr} \cdot Pr^{2/3} \quad (4.8)$$



Слика 4.1 Зависност Колбурновог фактора и коефицијента трења од Рејнолдсовог броја за размењивач топлоте JS-1, преузет из [18]

4.2 Trane Company Bulletin [19]

Компанија Trane је у марту 1953. године објавила билтен са геометријским карактеристикама и топлотним и струјним перформансама размењивача топлоте са оребреним цевима. У књизи [18] аутори су приказали у табеларној форми (табела 4.2) и у форми дијаграма податке за 4 различите конфигурације размењивача топлоте са завојним ребрима испитиваних у [19].

Табела 4.2 Геометријске карактеристике размењивача топлоте датих у [18]

Ознака размењивача топлоте	Tr-1	Tr -2	Tr -3	Tr -4
d_s (mm)	9,65	9,65	10,67	9,65
d_{kr} (mm)	10,56	10,56	11,64	10,46
δ_r (mm)	0,457	0,457	0,483	0,406
d_r (mm)	23,37	23,37	21,87	23,37
s_r (mm)	3,46	2,91	2,91	2,22
s_t (mm)	24,77	24,77	24,77	24,77
s_l (mm)	20,38	20,38	20,38	20,38

Карактеристична геометријска дужина је еквивалентни пречник дефинисан као

$$d_{eTr} = \frac{4 \cdot \varepsilon_{pov}}{s_v} \quad (4.9)$$

На основу података датих у [18], у табели 4.3 су дате вредности коефицијената за корелације које описују топлотне и струјне перформансе размењивача топлоте. Корелације су дате у облику

$$Nu_{Tr} = a \cdot Re_{Tr}^b \cdot Pr^{1/3} \quad (4.10)$$

$$\xi_{Tr} = c \cdot Re_{Tr}^d \quad (4.11)$$

и важе за Рејнолдсове бројеве у опсегу: $Re_{Tr} = 400 \div 10000$.

Табела 4.3 Коефицијенти за корелације топлотних и струјних перформанси датих у [18]

Ознака размењивача топлоте	Nu		ξ	
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
Tr-1	0,33	0,52	0,19	-0,20
Tr -2	0,23	0,59	0,21	-0,21
Tr -3	0,22	0,60	0,22	-0,20
Tr -4	*		0,20	-0,22

* Нису дати подаци о топлотним перформансама

4.3 В. Ф. Юдин [20]

У књизи [20] објављеној 1985. године аутор је у прилогу у табеларној форми приказао велики број експерименталних података о паду притиска и прелазу топлоте на цевним размењивачима топлоте са завојним ребрима у шаховском и у коридорном распореду цеви, као и за глатке цеви. Као топлији флуид при струјању кроз цеви је коришћена вода, а као хладнији флуид при струјању преко цевог снопа са стране ребара коришћен је ваздух.

У књизи је обрађено 29 радних режима за пад притиска са укупно 689 радних тачака и 74 радна режима за прелаз топлоте са укупно 1692 радне тачке, за шаховски распоред цеви.

Од 74 радна режима за прелаз топлоте, 7 режима са укупно 104 радне тачке се односи на глатке (неорребрене) цеви, а у 3 режима коришћени су следећи флуиди: хелијум (22 радне тачке), аргон (23 радне тачке) и угљен диоксид (19 радних тачака).

Геометријске карактеристике размењивача топлоте на којима је испитиван пад притиска дате су у табели 4.4, а за прелаз топлоте у табели 4.5. У табели 4.5 су приказане геометријске карактеристике размењивача са завојним ребрима за радне флуиде воду и ваздух.

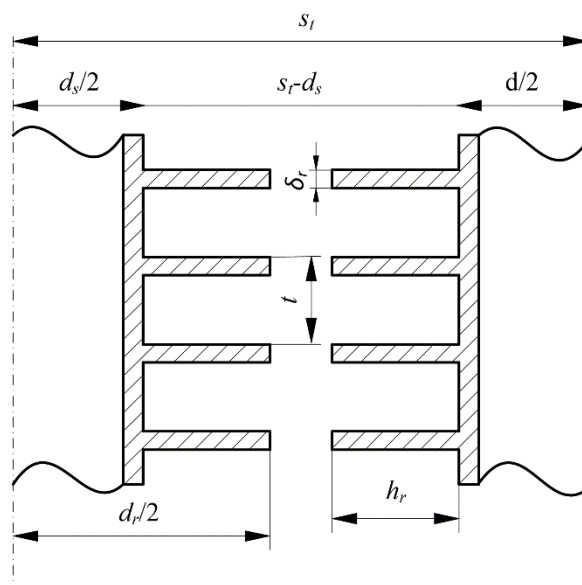
Аутор је у књизи дефинисао Рејнолдсов број у следећем облику

$$Re_J = \frac{w_J \cdot d_{eJ}}{\nu} \quad (4.12)$$

где је карактеристична дужина d_{eJ} дата у форми

$$d_{eJ} = \frac{2 \cdot [s_r \cdot (s_t - d_s) - 2 \cdot \delta_r \cdot h_r]}{2 \cdot h_r + s_r} \quad (4.13)$$

Сви геометријски параметри који фигуришу у једначини (4.13) су дефинисани на слици 4.2.



Слика 4.2 Геометријски параметри оребрених цеви размењивача испитиваних у [20]

Међутим, детаљном анализом експерименталних података дошло се до закључка да у приказаним Рејнолдсовим бројевима карактеристична дужина није еквивалентни пречник дефинисан једначином (4.13), већ је као карактеристична дужина употребљен спољни пречник цеви. Карактеристична брзина струјања је брзина у најужем пресеку размењивача топлоте

$$w_j = \frac{w_{kan}}{\varepsilon_{пов}} \quad (4.14)$$

У експерименталним подацима су дате вредности коефицијената прелаза топлоте и Нуселтових бројева који су дефинисани у следећем облику

$$\alpha_j = \frac{Q}{\Delta t \cdot S_{sp}} \quad (4.15)$$

$$Nu_j = \frac{d_s \cdot \alpha_j}{\lambda} \quad (4.16)$$

где је S_{sp} (m^2) површина глатких цеви рачуната као површина цилиндра пречника d_s , а λ коефицијент топлотне проводности за ваздух.

Табела 4.4 Геометријске карактеристике размењивача топлоте на којима је испитиван пад притиска

Ознака размењивача топлоте	d_s (mm)	d_{kr} (mm)	δ_r (mm)	d_r (mm)	s_r (mm)	s_l (mm)	s_l (mm)
Jpp-1	32	34,6	1,3	50	6	64	38,4
Jpp-2	32	34,6	1,3	50	6	64	48
Jpp-3	32	34,6	1,3	50	6	64	64
Jpp-4	32	34,6	1,3	50	6	64	96
Jpp-5	32	34,6	1,3	50	6	80	38,4
Jpp-6	32	34,6	1,3	50	6	80	64
Jpp-7	32	34,6	1,3	50	6	80	96
Jpp-8	32	34,6	1,3	50	6	96	38,4
Jpp-9	32	34,6	1,3	50	6	96	64
Jpp-10	32	34,6	1,3	50	6	96	96
Jpp-11	32	34,6	1,3	50	6	96	112
Jpp-12	32	34,6	1,3	50	6	132,8	38,4
Jpp-13	32	34,6	1,3	50	6	132,8	64
Jpp-14	32	34,6	1,3	50	6	132,8	96
Jpp-15	23	23	1,3	33	2	64,4	34,5
Jpp-16	23	23	1,3	43	2	69	36,8
Jpp-17	23	23	1,3	43	2	46	38
Jpp-18	23	23	1,3	33	2,5	64,9	34,5
Jpp-19	23	23	1,3	43	2,5	69	36,8
Jpp-20	23	23	1,3	53	2,5	72	41,4

Ознака размењивача топлоте	d_s (mm)	d_{kr} (mm)	δ_r (mm)	d_r (mm)	s_r (mm)	s_t (mm)	s_l (mm)
Јрр-21	23	23	1,3	33	3	64,9	34,5
Јрр-22	23	23	1,3	43	3	69	27,6
Јрр-23	23	23	1,3	53	3	72	41,4
Јрр-24	23	23	1,3	27	5	69	27,6
Јрр-25	23	23	1,3	33	5	69	27,6
Јрр-26	23	23	1,3	43	5	69	27,6
Јрр-27	23	23	1,3	53	5	72	41,4
Јрр-28	23	23	1,3	63	5	72	54,1
Јрр-29	23	23	1,3	43	8	69	27,6

Табела 4.5 Геометријске карактеристике размењивача топлоте на којима је испитиван прелаз топлоте

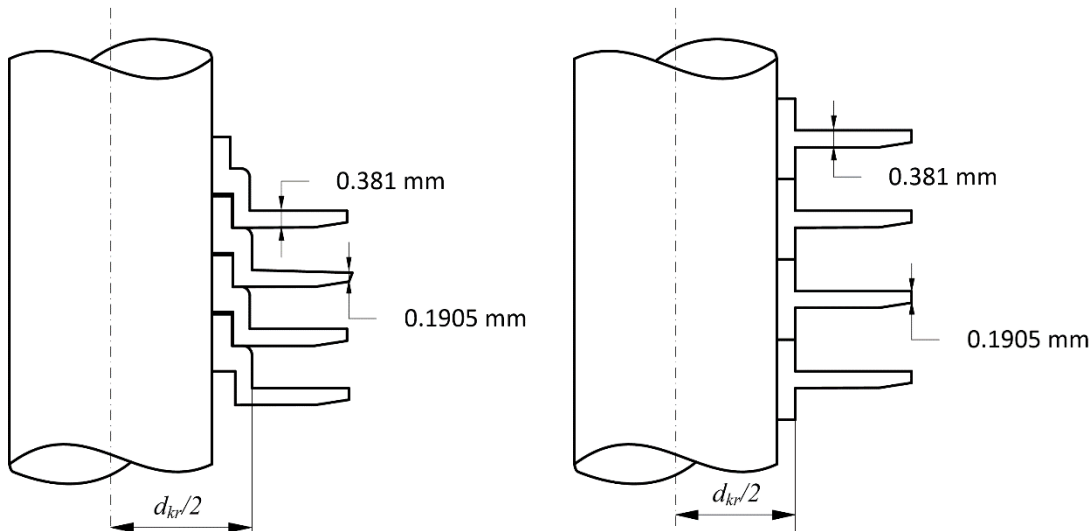
Ознака размењивача топлоте	d_s (mm)	d_{kr} (mm)	δ_r (mm)	d_r (mm)	s_r (mm)	s_t (mm)	s_l (mm)
Јрт-1	32	34,6	1,3	50	6	64	38,4
Јрт-2	32	34,6	1,3	50	6	64	64
Јрт-3	32	34,6	1,3	50	6	64	96
Јрт-4	32	34,6	1,3	50	6	96	38,4
Јрт-5	32	34,6	1,3	50	6	96	64
Јрт-6	32	34,6	1,3	50	6	96	96
Јрт-7	32	34,6	1,3	50	6	64	48
Јрт-8	32	34,6	1,3	50	6	80	38,4

Ознака размењивача топлоте	d_s (mm)	d_{kr} (mm)	δ_r (mm)	d_r (mm)	s_r (mm)	s_t (mm)	s_l (mm)
Jpt-9	32	34,6	1,3	50	6	80	64
Jpt-10	32	34,6	1,3	50	6	80	96
Jpt-11	32	34,6	1,3	50	6	96	112
Jpt-12	32	34,6	1,3	50	6	132,8	38,4
Jpt-13	32	34,6	1,3	50	6	132,8	64
Jpt-14	32	34,6	1,3	50	6	132,8	96
Jpt-15	23	25,6	1,3	33	2	64,86	34,5
Jpt-16	23	25,6	1,3	43	2	69	36,8
Jpt-17	23	25,6	1,3	43	2	46	37,95
Jpt-18	23	25,6	1,3	33	2,5	64,86	34,5
Jpt-19	23	25,6	1,3	43	2,5	69	36,8
Jpt-20	23	25,6	1,3	26	2,5	72	41,4
Jpt-21	23	25,6	1,3	33	3	64,86	34,5
Jpt-22	23	25,6	1,3	43	3	69	27,6
Jpt-23	23	25,6	1,3	53	3	72	41,4
Jpt-24	23	25,6	1,3	27	5	69	27,6
Jpt-25	23	25,6	1,3	33	5	69	27,6
Jpt-26	23	25,6	1,3	43	5	69	27,6
Jpt-27	23	25,6	1,3	53	5	72	41,4
Jpt-28	23	25,6	1,3	63	5	72	54,05
Jpt-29	23	25,6	1,3	43	8	69	27,6

4.4 Eckels и Rabas [21]

Два истраживача из компаније Westinghouse Electric су у раду објављеном 1985. године обавили испитивања на размењивачима топлоте са завојним ребрима, при чему је оребрење формирано на два начина, као што је приказано на слици 4.3. У првом случају коришћена је трака са „L“ постољем, при чему се њеним намотавањем на глатку цев формира преклоп. У другом случају коришћена је трака са „Т“ постољем чијим се намотавањем на глатку цев формира оребрење.

Први циљ аутора овог рада је био да се утврди да ли постоји разлика у топлотним и струјним перформансама између геометријски сличних „L“ и „Т“ оребрених цеви, а други циљ је био да се утврди утицај броја редова цеви на пад притиска и прелаз топлоте. Аутори су у чланку приказали поређење резултата сопствених мерења са резултатима мерења осталих аутора који су се бавили испитивањем пада притиска и прелаз топлоте на цевним размењивачима топлоте са завојним ребрима. Међутим, аутори су у раду приказали измерене податке за прелаз топлоте и пад притиска у форми дијаграма (слика 4.4) за само једну конфигурацију размењивача топлоте чије су геометријске карактеристике дате у табели 4.6.



Слика 4.3 Формирања оребрења са тракама са „L“ и са „Т“ постољем

У чланку је дефинисан Колбурнов фактор у облику

$$j_H = \frac{\alpha}{G \cdot c_p \cdot \text{Pr}^{2/3}} \quad (4.17)$$

као и Фанингов коефицијент трења

$$f = \frac{\Delta p_0 \cdot \rho_0}{2 \cdot N_{cl} \cdot G^2} \quad (4.18)$$

где су:

- α (W/m²K), коефицијент прелаза топлоте цевног снопа;
- N_{cl} , број редова цеви у правцу струјања ваздуха;
- Δp_0 (Pa), пад притиска са стране ваздуха сведен на стандардне услове;
- ρ_0 (kg/m³), густина ваздуха сведена на стандардне услове ($\rho_0 = 1,20$ kg/m³);
- G (kg/(m²·s)), масена брзина ваздуха.

Такође, аутори су дефинисали Рејнолдсов број

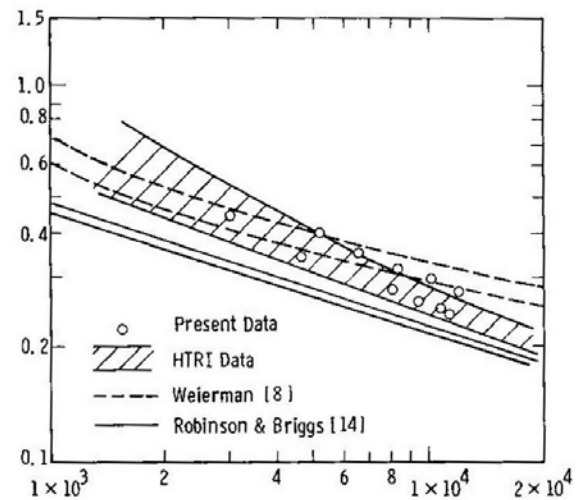
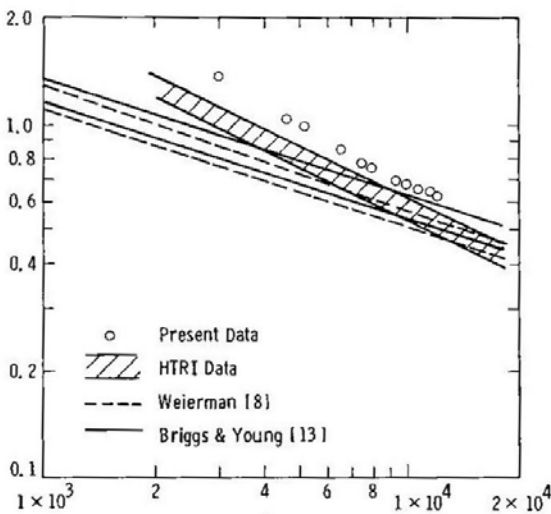
$$Re = \frac{Gd_{kr}}{\mu} \quad (4.19)$$

где су:

- d_{kr} (m), пречник цеви са додатом двоструком дебљином ребра, дефинисан на слици 4.3;
- μ (Pa·s), динамичка вискозност ваздуха.

Табела 4.6 Геометријске карактеристике размењивача топлоте из чланка [21]

d_s (mm)	d_{kr} (mm)	δ_r (mm)	d_r (mm)	s_r (mm)	s_t (mm)	s_l (mm)
25,40	26,87	0,38	57,14	2,31	63,50	54,99



Слика 4.4 Зависност Колбурновог фактора од Рејнолдсовог броја (лево) и коефицијента трења од Рејнолдсовог броја (десно) и њихово поређење са подацима осталих аутора, преузето из [21]

4.5 He FaJiang, Cao WeiWu и Yan Ping [22]

Тим истраживача са Шангајског Универзитета је 2012. године обавио истраживање топлотних и струјних перформанси на 13 различитих конфигурација размењивача топлоте са завојно оребреним цевима у шаховском распореду. Спољни пречник цеви у свим конфигурацијама износи 32 mm, а варирани су корак ребра, висина ребра, подужни и попречни корак цеви. Аутори су у форми дијаграма приказали велики број експерименталних података, а дали су и корелације за Нуселтов и Ојлеров број у облику:

$$\text{Nu} = 0,138 \cdot \left(\frac{s_l}{d_s}\right)^{0,263} \cdot \left(\frac{s_t}{d_s}\right)^{-0,194} \cdot \left(\frac{s_r}{d_s}\right)^{0,168} \cdot \left(\frac{d_r}{d_s}\right)^{-0,132} \cdot \text{Re}^{0,68} \cdot \text{Pr}^{0,33} \quad (4.20)$$

$$\text{Eu} = 2,926 \cdot \left(\frac{s_l}{d_s}\right)^{0,475} \cdot \left(\frac{s_t}{d_s}\right)^{0,138} \cdot \left(\frac{s_r}{d_s}\right)^{0,325} \cdot \left(\frac{d_r}{d_s}\right)^{0,212} \cdot \text{Re}^{228} \quad (4.21)$$

С обзиром да аутори у чланку нису дефинисали карактеристичну величину у Рејнолдсовом и Нуселтовом броју, као ни карактеристичну брзину струјања, приказани подаци се не могу искористити за обраду, односно није могуће извршити њихово прерачунавање.

4.6 Постојеће корелације

Поред наведених аутора који су објавили резултате експерименталног истраживања топлотних и струјних перформанси на размењивачима топлоте са завојно оребреним цевима, у дисертацији је обухваћена и анализа постојећих корелација доступних у отвореној литератури.

Све напред наведене корелације ће бити примењене на комплетну базу експерименталних података из отворене литературе, као и на податке добијене сопственим мерењима којим су обухваћене различите конфигурације размењивача топлоте са завојно оребреним цевима који се најчешће срећу у индустријској пракси. На тај начин ће се утврдити поузданост њихове примене при одређивању пада притиска и/или интензитета размене топлоте између воде као топлијег флуида и ваздуха који струји преко снопа оребрених цеви.

4.6.1 A. Y. Gunter и W. A. Shaw [23]

У чланку [23] је први пут објављена корелација за пад притиска при струјању флуида преко снопа оребрених цеви за различите облике ребара и геометрије цеви у облику

$$\frac{f}{2} = \frac{\Delta p \cdot g \cdot d_h \cdot \rho}{G^2 \cdot L} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_g}\right)^{0,14} \cdot \left(\frac{d_h}{s_t}\right)^{-0,4} \cdot \left(\frac{s_l}{s_t}\right)^{-0,8} = \phi(\text{Re}_{GS}) \quad (4.22)$$

Више аутора ([24], [25], [26], [27]) је, пре објављивања чланка [23], дало корелације за пад притиска и прелаз топлоте при струјању флуида преко снопа глатких (неоребрених) цеви, при чему је карактеристична величина у Рејнолдсовом броју углавном био спољашњи пречник цеви.

С обзиром на знатно сложенију геометрију оребрених цеви, аутори су у чланку [23] први пут као карактеристичну величину у Рејнолдсовом броју употребили хидраулички пречник дефинисан на следећи начин

$$d_h = 4 \cdot \frac{V_{min}}{S_s} \quad (4.23)$$

где је V_{min} укупна запремина међуцевног простора (запремина канала у ком је смештен цевни сноп умањен за запремину цеви), а S_s укупна оквашена површина.

Рејнолдсов број је дефинисан у следећем облику

$$Re_{GS} = \frac{d_h \cdot G}{\mu} \quad (4.24)$$

где је G ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) масена брзина флуида сведена на минималну проточну површину, а μ ($\text{Pa} \cdot \text{s}$) динамичка вискозност флуида.

У изразу (4.22) фигурише поправни коефицијент (μ / μ_g) дефинисан као однос вискозности ваздуха на просечној температури у основној маси и вискозности ваздуха на температури површине цеви.

За Рејнолдсове бројеве до 200, једначина (4.22) има облик

$$\frac{f}{2} = 90 \cdot Re_{GS}^{-1} \quad (4.25)$$

а за Рејнолдсове бројеве преко 200

$$\frac{f}{2} = 0,96 \cdot Re_{GS}^{-0,145} \quad (4.26)$$

4.6.2 Briggs и Young [28]

У чланку [28] аутори су дали корелацију за прелаз топлоте у следећој форми

$$St \cdot Pr^{2/3} \cdot \left(\frac{s_r}{h_r} \right)^{-0,296} = 0,1378 \cdot Re_{BJ}^{-0,282} \quad (4.27)$$

Рејнолдсов облик је дефинисан у облику

$$Re_d = \frac{G \cdot d}{\mu} \quad (4.28)$$

Стандардна девијација корелације (4.27) има вредност 5,1%, а последица је обраде резултата сопствених мерења и није потврђена туђим експерименталним подацима, па је њена генерализација упитна.

4.6.3 Robinson и Briggs [29]

У чланку [29] аутори су дали корелацију за пад притиска у следећој форми

$$f \cdot \left(\frac{s_l}{d}\right)^{0,927} \cdot \left(\frac{s_l}{s_d}\right)^{-0,515} = 9,465 \cdot \text{Re}_{RB}^{-0,316} \quad (4.29)$$

где су:

- $f = 0.25 \cdot \xi \cdot W$, Фанингов коефицијент трења;
- $\xi = 2 \cdot \Delta p / (2 \cdot N_{cl} \cdot G^2)$, коефицијент трења;
- W однос површине за размену топлоте са стране ребара и слободне проточне површине;
- s_d (m), дијагонални корак цеви.

Рејнолдсов број је дефинисан на исти начин као (4.28).

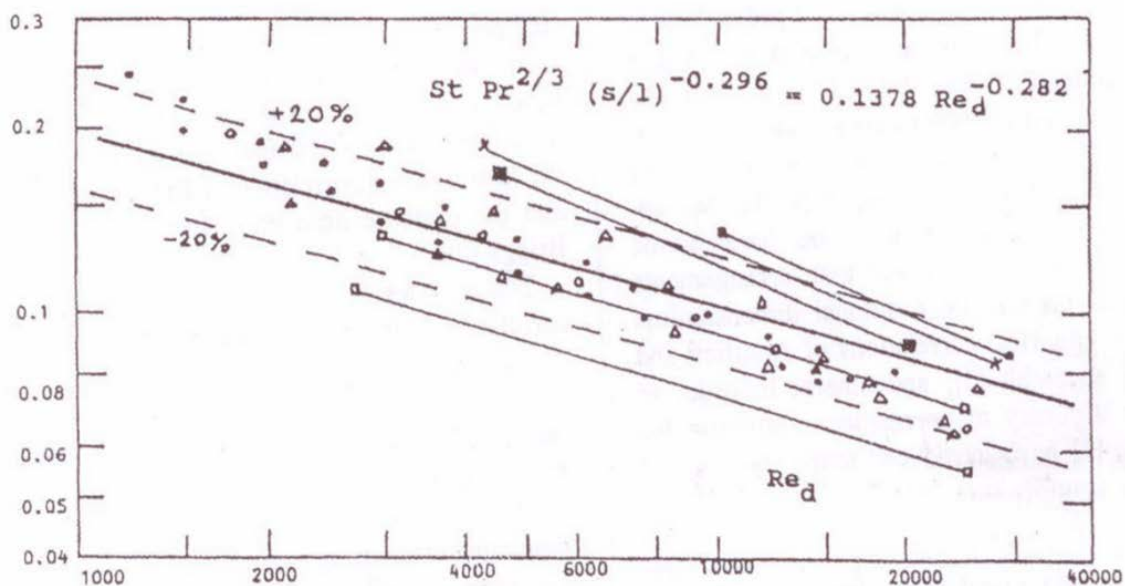
Стандардна девијација корелације (4.29) има вредност 7,8%, а, као и у случају корелације (4.27), последица је обраде резултата сопствених мерења и није потврђена туђим експерименталним подацима, па се не може извршити ни њена генерализација.

4.6.4 Nir [30]

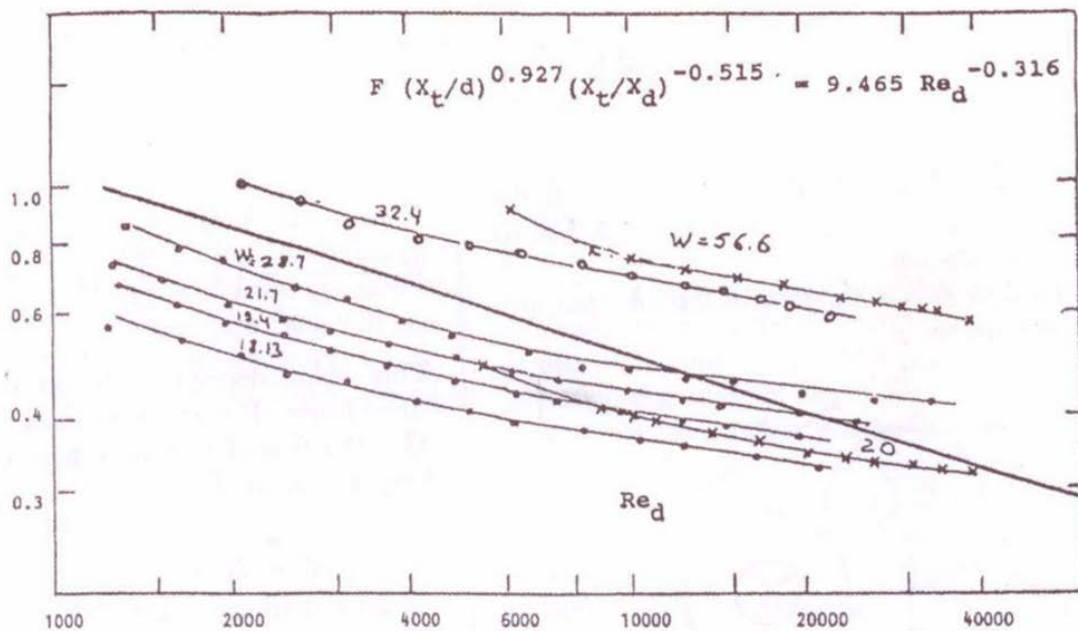
У чланку [30] аутор је применио корелације (4.27) и (4.29) на одређени број експерименталних података доступних у том тренутку и приказао их у форми дијаграма. Дијаграми са зависностима коефицијента прелаза топлоте и пада притиска од Рејнолдсовог броја преузети из чланка [30] су приказани на сликама 4.5 и 4.6.

Подаци за прелаз топлоте на цевном снопу са сегментним (разрезаним) ребрима се налазе знатно изнад корелационе линије у целом опсегу Рејнолдсових бројева, а то је посебно изражено при малим вредностима Рејнолдсових бројева. Подаци за равна попречна ребра се простиру у опсегу од $\pm 20\%$ од корелационе линије.

Поређењем експерименталних података за коефицијент трења са корелацијом (4.29) може се приметити велико расипање података, на основу чега се може закључити да је поменута корелација недовољно сигурна за употребу у инжењерској пракси.



Слика 4.5 Корелација (4.27) примењена на експерименталне податке различитих аутора, преузето из [30]



Слика 4.6 Корелација (4.29) примењена на експерименталне податке различитих аутора, преузето из [30]

Поред анализе постојећих, аутор је предложио своје корелације за пад притиска и прелаз топлоте при струјању ваздуха преко снопа оребрених цеви. Он је издвојио и анализирао утицај три бездимензиона фактора на пад притиска и прелаз топлоте:

- Фактор W_N је однос површине за размену топлоте са стране оребрења и минималне слободне површине за проток флуида и узима у обзир чињеницу да део флуида приликом струјања пролази кроз простор између ребара;
- Следећи фактор узима у обзир чињеницу да део флуида приликом струјања преко снопа оребрених цеви пролази кроз слободан простор који се формира у зони од врха ребра до врха следећег ребра по висини једног реда цеви;
- Приликом проласка флуида преко првог реда оребрених цеви температурско и брзинско поље постаје неравномерно. Такође, брзина флуида се мења приликом узастопног проласка кроз фронталну и дијагоналну слободну површину. Овај утицај је обухваћен фактором који је дефинисан односом дијагоналне и фронталне слободне површине.

Предложена корелација за прелаз топлоте при струјању флуида преко снопа цеви са равним и разрезаним ребрима има облик

$$St \cdot Pr^{2/3} = 1,745 \cdot Re_N^{-0,4} \cdot W_N^{-2/3} \cdot R_b^{-0,4} \cdot K_{z,h} \quad (4.30)$$

и важи у опсегу: $Re_N = 300 - 10000$, $W_N = 10 - 60$, $R_b = 1,0 - 3,0$, $R_d = 1,0 - 4,6$, $N_z > 1$.

Корелација за пад притиска при струјању флуида преко снопа цеви са равним ребрима је дата у облику

$$\xi = 3,0 \cdot Re_N^{-0,25} \cdot W_N^{-0,8} \cdot K_{z,p} \quad (4.31)$$

а за разрезана ребра

$$\xi = 1,75 \cdot Re_N^{-0,25} \cdot W_N^{-0,57} \cdot K_{z,p} \quad (4.32)$$

и обе важе у опсегу: $Re_N = 300 - 10000$, $W_N = 8,5 - 60$, $R_b = 1,0 - 3,0$, $R_d \geq \alpha$, $N_z \geq 1$.

Величине које фигуришу у горњим једначинама су дефинисане на следећи начин:

$$R_b = \frac{S_{sl}}{S_f} \quad (4.33)$$

$$S_{sl} = 2 \cdot [s_d - d_r + (d_r - d) \cdot (1 - \delta_r \cdot N_r)] \quad (4.34)$$

$$S_f = s_l - d_r + (d_r - d) \cdot (1 - \delta_r \cdot N_r) \quad (4.35)$$

где су:

- R_b , фактор који је дефинисан односом слободне површине попречног пресека у правцу струјања (укупна фронтална површина умањена за површину коју заузимају цеви) и слободне површине попречног пресека између ребара цеви;

- S_{sl} , слободна површина попречног пресека у правцу струјања;
- S_f , слободна површина попречног пресека између ребара цеви;
- $K_{z,h}$, корекциони фактор коефицијента прелаза топлоте који зависи од броја редова цеви;
- $K_{z,p}$, корекциони фактор за пад притиска који зависи од броја редова цеви.

Као што је већ напоменуто, највећи број постојећих корелација су формиране на бази сопствених експерименталних истраживања, и нису потврђене туђим експерименталним подацима.

5 ОПИС ЕКСПЕРИМЕНТАЛНЕ ИНСТАЛАЦИЈЕ

Испитивање топлотних и струјних перформанси размењивача топлоте се врше према ЕН нормама за ову област, које су дефинисане у [31], [32], [33], [34]. На основу ових стандарда су дате препоруке за припрему поступака испитивања топлотних перформанси и пада притиска код размењивача топлоте [35] и [36]. На основу ових стандарда Лабораторија за процесну технику, енергетску ефикасност и заштиту животне средине је акредитована као део Центра за квалитет који послује у оквиру Машинског факултета у Београду.

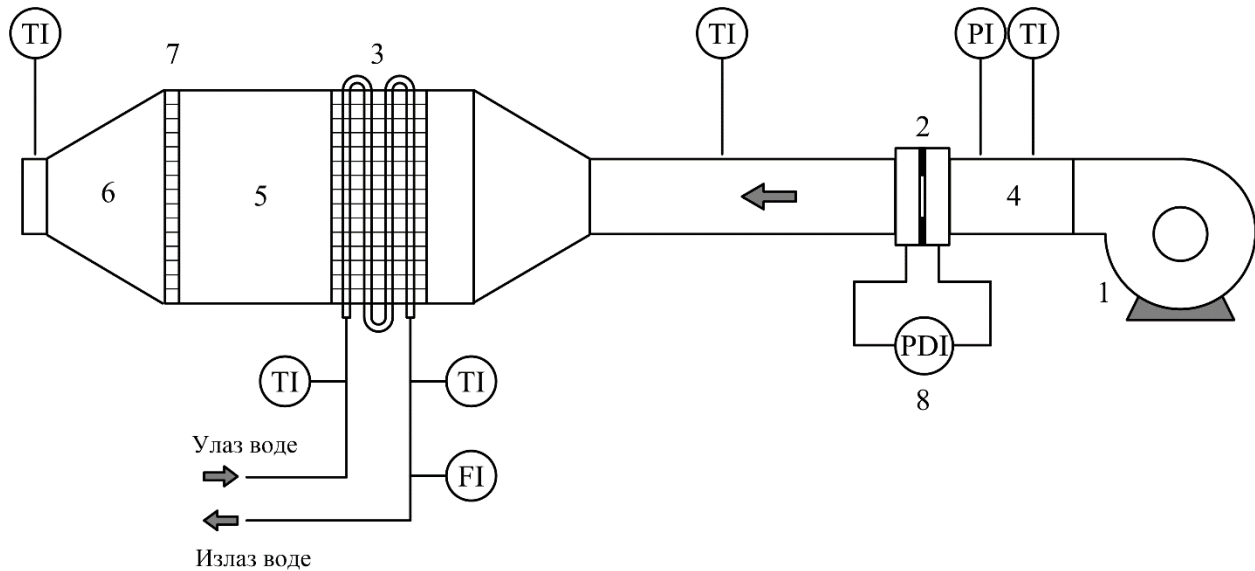
Циљ докторске дисертације јесте дефинисање поузданих прорачунских процедура за одређивање пада притиска и коефицијента прелаза топлоте у међуцевном простору размењивача топлоте са завојно оребреним цевима. Испитивање параметара размењивача топлоте је подељено у два дела. Прво је извршено испитивање интензитета размене топлоте, а затим испитивање пада притиска на три различите конфигурације размењивача топлоте, чије су геометријске карактеристике дате у табели 5.1.

Табела 5.1 Геометријске карактеристике испитиваних размењивача топлоте

Ознака размењивача топлоте	1	2	3
H (mm) висина размењивача топлоте	403		
W (mm) ширина размењивача топлоте	510		
L (mm) дужина размењивача топлоте	106,8	178	249,2
d_s (mm) спољни пречник цеви	16,5		
d_{kr} (mm) пречник у корену ребра	16,6		
δ_r (mm) дебљина ребра	0,2		
d_r (mm) пречник ребра	28		
s_r (mm) корак ребра	2,8		
s_t (mm) попречни корак цеви	35,6		
s_l (mm) подужни корак цеви	35,6		
N_{cl} , број цеви у правцу струјања ваздуха	2	4	6
N_{ct} , број цеви у једном реду	11		

5.1 Инсталација за испитивање интензитета размене топлоте

Испитивање интензитета размене топлоте при струјању ваздуха преко снопа завојно оребрених цеви је извршено у топлотној подстанци Машинског факултета (због доступности припремљене топле воде у зимском периоду), на инсталацији чија је шема приказана на слици 5.1.



Слика 5.1 Шематски приказ експерименталне инсталације за испитивање интензитета размене топлоте

Ваздух из просторије се помоћу вентилатора (1) каналом (4) транспортује ка размењивачу топлоте (3). Након проласка преко размењивача топлоте, ваздух се каналском деоницом (5) усмерава ка излазном конфузору (6). Између деонице (5) и излазног конфузора (6) се налази мрежа (7) чији је задатак да умири струју ваздуха након изласка из секције са размењивачима топлоте.

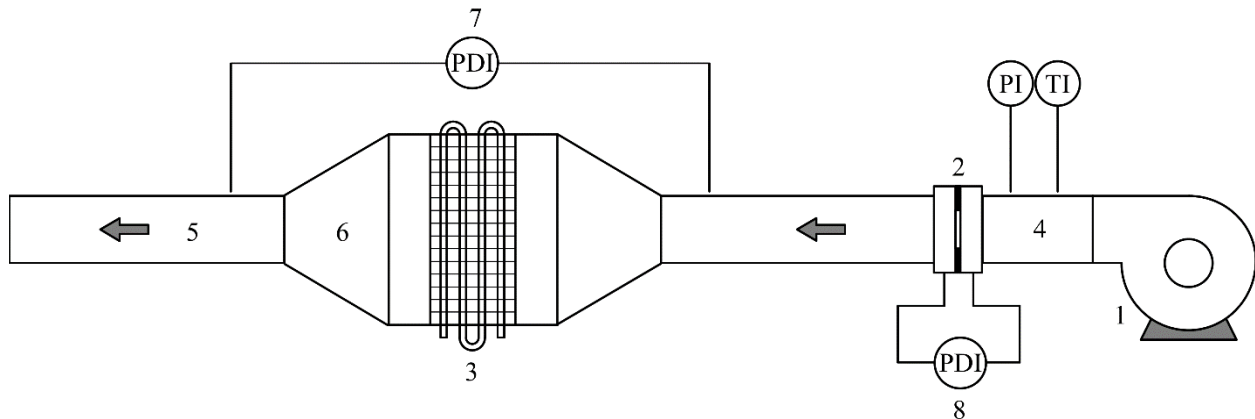
Мерење протока ваздуха се обавља помоћу мерне бленде (2) која је опремљена прикључцима за манометар за мерење надпритиска испред бленде, као и за манометар за мерење диференцијалног притиска (8). Израда и уградња мерне бленде је обављена у складу са стандардом [37]. Температура ваздуха се мери термопаром постављеним у каналу (4).

За мерење температуре ваздуха испред и иза размењивача топлоте користе се термопарови, с тим што се мерење температуре ваздуха иза размењивача топлоте врши у 4 тачке на излазном пресеку конфузора након чега се врши осредњавање температуре. Након проласка кроз излазни конфузор, загрејани ваздух се усмерава ка одсисном вентилатору који ваздух преко излазне решетке транспортује ван испитне просторије, чиме се спречава подизање температуре просторије.

Мерење температуре топле воде се врши помоћу термопарова смештених у чаурама у потисном и повратном цевоводу непосредно испред размењивача топлоте. Проток воде је мерен ултразвучним мерилем KROHNE постављеним на потисном цевоводу, при чему су поштоване све препоруке које се тичу дужине праволинијске деонице цевовода на који се уређај за мерење протока поставља.

5.2 Инсталација за испитивање пада притиска

Испитивање пада притиска је извршено у Лабораторији за процесну технику Машинског факултета при изотермским условима, тј. без протицања топле воде кроз размењивач топлоте. Један од првих чланака у ком се показује занемарљивост утицаја протицања топле воде кроз цеви размењивача топлоте на пад притиска са стране ваздуха је [17]. Испитивање је извршено на инсталацији чија је шема дата на слици 5.2.



Слика 5.2 Шематски приказ експерименталне инсталације за испитивање пада притиска

Ваздух из просторије се помоћу вентилатора (1) каналом (4) транспортује ка размењивачу топлоте (3). Након проласка преко размењивача топлоте, ваздух се каналском деоницом (5) усмерава ка излазном пресеку.

Мерење протока ваздуха се обавља на исти начин као мерење протока ваздуха приликом испитивања интензитета размене топлоте, тј. помоћу мерне бленде (2). Пад притиска на размењивачима топлоте се мери помоћу дигиталног диференцијалног манометра (7). Температура ваздуха се мери термопаром постављеним у каналу (4).

Приликом испитивања интензитета размене топлоте и пада притиска при струјању ваздуха преко снопа завојно оребрених цеви сви мерни уређаји су повезани на уређај за аквизицију НИОКИ у ком се вршило прикупљање података.

Мерења су вршена након успостављања стационарног стања, односно након што је извршено загревање (хлађење) мерне и помоћне опреме и након што су сви мерни параметри стабилизовани, тако да у тренутку читавања података није била примећена промена температура воде, ваздуха или просторије, као ни великих осцилација разлике притисака на манометрима. Поред услова стационарности, испуњени су и услови поновљивости мерења.

6 МАТЕМАТИЧКА ОБРАДА РЕЗУЛТАТА ЕКСПЕРИМЕНАТА

Сврха експерименталног рада је добијање информација о понашању реалних објеката на бази којих се може израдити математички модел, извршити његова корекција и верификација. Математичка обрада резултата експеримената је заснована на статистичким методама које се користе за процену квалитета резултата мерења. Циљ математичке обраде резултата експеримената је одређивање функционалних зависности у облику бездимензионих једначина.

Приликом испитивања топлотних перформанси цевних размењивача топлоте са завојно оребреним цевима мерене су следеће величине:

- \dot{V}_1 (m³/s), запремински проток топлијег флуида (воде);
- \dot{V}_2 (m³/s), запремински проток хладнијег флуида (ваздуха);
- t_{1p} (°C), температура топлијег флуида на улазу у размењивач;
- t_{1k} (°C), температура топлијег флуида на излазу из размењивача;
- t_{2p} (°C), температура хладнијег флуида на улазу у размењивач;
- t_{2k} (°C), температура хладнијег флуида на излазу из размењивача;
- Δp_{bg} (Pa), пад притиска на бленди за ваздух;
- p_{mbg} (Pa), надпритисак ваздуха испред бленде.

Приликом испитивања пада притиска на размењивачима топлоте са завојно оребреним цевима мерене су следеће величине:

- \dot{V}_2 (m³/s), запремински проток ваздуха;
- t_2 (°C), температура ваздуха;
- Δp_{bg} (Pa), пад притиска на бленди за ваздух;
- p_{mbg} (Pa), надпритисак ваздуха испред бленде;
- Δp_2 (Pa), пад притиска ваздуха на размењивачу топлоте.

Све вредности величина мерених приликом испитивања топлотних и струјних перформанси приказане су табеларно у Прилогу 1.

6.1 Процена квалитета резултата мерења

За процену квалитета резултата мерења коришћен је алгоритам из [12].

Грешке мерења појединачних величина су: грешка мерења температуре (оцена дисперзије) $s_t = 0,1^\circ\text{C}$ и грешка мерења протока $s_m = 3\%$.

Термофизичка својства ваздуха и воде, као радних флуида, рачуната су према [6].

Топлотна снага размењивача рачуната преко података за топлији флуид је

$$\dot{Q}_1 = \dot{m}_1 \cdot c_{p1} \cdot (t_{1p} - t_{1k}) \quad (6.1)$$

док се за хладнији флуид добија

$$\dot{Q}_2 = \dot{m}_2 \cdot c_{p2} \cdot (t_{2k} - t_{2p}) \quad (6.2)$$

где су c_{p1} и c_{p2} (J/(kg·K)) специфични топлотни капацитети топлијег и хладнијег флуида респективно.

Средња вредност топлотне снаге (узорак мерених вредности од два члана) се изражава у облику

$$\bar{Q} = \frac{\dot{Q}_1 + \dot{Q}_2}{2} \quad (6.3)$$

а грешка мерења топлотне снаге износи

$$s_Q = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\dot{Q}_i - \bar{Q})^2} \quad (6.4)$$

па се топлотна снага изражава у облику $\bar{Q} \pm s_Q$.

Стационарност радног режима се може проценити на основу односа

$$\Delta_{St} = \frac{s_Q}{\bar{Q}} \quad (6.5)$$

а поред наведеног критеријума у литератури се често помиње и критеријум

$$\Delta_{od} = \frac{\dot{Q}_1}{\dot{Q}_2} \quad (6.6)$$

Коефицијент пролаза топлоте, на основу резултата мерења, може одредити помоћу израза

$$k = \frac{\bar{Q}}{S_{rt} \cdot \Delta t_{sr}} \quad (6.7)$$

где је средња температурска разлика [1]

$$\Delta t_{sr} = \varepsilon \cdot \frac{(t_{1p} - t_{2k}) - (t_{1k} - t_{2p})}{\ln \frac{t_{1p} - t_{2k}}{t_{1k} - t_{2p}}} \quad (6.8)$$

а ε је корекциони фактор за средњу температурску разлику.

Дисперзија коефицијента пролаза топлоте који је функција топлотне снаге \dot{Q} , средње температурске разлике Δt_{sr} и површине за размену топлоте S_{rt} је на основу једначине (6.7)

$$s_k^2 = \left[\frac{\partial}{\partial \dot{Q}} \left(\frac{\dot{Q}}{S_{rt} \cdot \Delta t_{sr}} \right) \right]^2 \cdot s_{\dot{Q}}^2 + \left[\frac{\partial}{\partial S_{rt}} \left(\frac{\dot{Q}}{S_{rt} \cdot \Delta t_{sr}} \right) \right]^2 \cdot s_S^2 + \left[\frac{\partial}{\partial \Delta t_{ln}} \left(\frac{\dot{Q}}{S_{rt} \cdot \Delta t_{sr}} \right) \right]^2 \cdot s_{\Delta t_{sr}}^2 \quad (6.9)$$

Дисперзија средње температурске разлике $s_{\Delta t_{sr}}$ је функција четири мерене температуре па се рачуна на следећи начин

$$s_{\Delta t_{sr}}^2 = \left[\frac{\partial(\Delta t_{sr})}{\partial t_{1p}} \right]^2 \cdot s_t^2 + \left[\frac{\partial(\Delta t_{sr})}{\partial t_{1k}} \right]^2 \cdot s_t^2 + \left[\frac{\partial(\Delta t_{sr})}{\partial t_{2p}} \right]^2 \cdot s_t^2 + \left[\frac{\partial(\Delta t_{sr})}{\partial t_{2k}} \right]^2 \cdot s_t^2 \quad (6.10)$$

Потребно је још одредити одговарајуће парцијалне изводе:

$$\frac{\partial}{\partial \dot{Q}} \left(\frac{\dot{Q}}{S_{rt} \cdot \Delta t_{sr}} \right) = \frac{1}{S_{rt} \cdot \Delta t_{sr}} \quad (6.11)$$

$$\frac{\partial}{\partial S_{rt}} \left(\frac{\dot{Q}}{S_{rt} \cdot \Delta t_{sr}} \right) = - \frac{\dot{Q}}{S_{rt}^2 \cdot \Delta t_{sr}} \quad (6.12)$$

$$\frac{\partial}{\partial \Delta t_{sr}} \left(\frac{\dot{Q}}{S_{rt} \cdot \Delta t_{sr}} \right) = - \frac{\dot{Q}}{S_{rt} \cdot (\Delta t_{sr})^2} \quad (6.13)$$

$$\frac{\partial(\Delta t_{sr})}{\partial t_{1p}} = \frac{\varepsilon}{\ln \frac{t_{1p} - t_{2k}}{t_{1k} - t_{2p}}} - \frac{\varepsilon \cdot \Delta t_{sr}}{(t_{1p} - t_{2k}) \cdot \ln \frac{t_{1p} - t_{2k}}{t_{1k} - t_{2p}}} \quad (6.14)$$

$$\frac{\partial(\Delta t_{sr})}{\partial t_{1k}} = - \frac{\varepsilon}{\ln \frac{t_{1p} - t_{2k}}{t_{1k} - t_{2p}}} + \frac{\varepsilon \cdot \Delta t_{sr}}{(t_{1k} - t_{2p}) \cdot \ln \frac{t_{1p} - t_{2k}}{t_{1k} - t_{2p}}} \quad (6.15)$$

$$\frac{\partial(\Delta t_{sr})}{\partial t_{2p}} = \frac{\varepsilon}{\ln \frac{t_{1p} - t_{2k}}{t_{1k} - t_{2p}}} - \frac{\varepsilon \cdot \Delta t_{sr}}{(t_{1k} - t_{2p}) \cdot \ln \frac{t_{1p} - t_{2k}}{t_{1k} - t_{2p}}} \quad (6.16)$$

$$\frac{\partial(\Delta t_{sr})}{\partial t_{2k}} = -\frac{\varepsilon}{\ln \frac{t_{1p} - t_{2k}}{t_{1k} - t_{2p}}} + \frac{\varepsilon \cdot \Delta t_{sr}}{(t_{1p} - t_{2k}) \cdot \ln \frac{t_{1p} - t_{2k}}{t_{1k} - t_{2p}}} \quad (6.17)$$

На основу резултата мерења се може рећи да коефицијент пролаза топлоте износи $k \pm s_k$, а да је прецизност мерења коефицијента пролаза топлоте

$$S_k = \frac{s_k}{k} \quad (6.18)$$

Коефицијент пролаза топлоте сведен на унутрашњу површину размењивача износи

$$\frac{1}{k_{un}} = \left(\frac{1}{\alpha_1} + R_1 \right) + \frac{d_u}{2 \cdot \lambda_z} \cdot \ln \frac{d_s}{d_u} + \frac{d_u}{2 \cdot \lambda_r} \cdot \ln \frac{d_{kr}}{d_s} + \left(\frac{1}{\alpha_2} + R_2 \right) \cdot \frac{S_{un}}{S_{sp} \cdot \eta_2} \quad (6.19)$$

где је η_2 ефикасност оребрене површине.

Коефицијент прелаза топлоте са стране топлијег флуида (на мерењима је то била вода) се израчунава помоћу једначине

$$\alpha_1 = Nu_1 \cdot \frac{\lambda_1}{d_u} \quad (6.20)$$

Нуселтов број при ламинарном режиму струјања за вертикалне и хоризонталне цеви, на основу података из [38], [39], [40], [41], [42], [43], [44], [45] се може израчунати на основу следећег израза

$$Nu_1 = Nu_{1fd} + \frac{0,01 \cdot Gz^{1,7}}{1 + 0,01 \cdot Gz^{1,3}} \cdot \phi_t \quad (6.21)$$

Једначина (6.21) важи у опсегу $Re = 3,35 \div 1990$, $Pr = 4,65 \div 12100$, $\mu / \mu_z = 0,0048 \div 11,7$, $Gz = 1,4 \div 6500$, а параметри који у њој фигуришу су:

- $Nu_{1fd} = 3,657$ у случају константне температуре зида;
- $Nu_{1fd} = 4,364$ када је топлотни флукс кроз зид цеви константан;
- Gz , Грецов број

$$Gz = Pe \cdot \frac{d_u}{L_c} \quad (6.22)$$

- Pe , Пеклеов број

$$Pe = Re \cdot Pr \quad (6.23)$$

- Pr , Прантлов број

$$Pe = \frac{c_p \cdot \mu}{\lambda} \quad (6.24)$$

- c_p (J/(kg · K)), специфични масени топлотни капацитет флуида;

- λ (W/(m · K)), коефицијент топлотне проводности флуида;

- L_c (m), дужина цеви.

Према [42] уведен је корекциони фактор који узима у обзир промену температурског профила у струјном пресеку

$$\phi_t = (\mu / \mu_z)^{0,14} \quad (6.25)$$

где је μ_z (Pa·s) динамичка вискозност течности на средњој температури зида t_z (°C), док се за гасове оваква корекција обично не врши.

За прелазни и турбулентни режим струјања (област $Re_1 = 2000 \div 600 \cdot 10^3$, $Pr = 0,2 \div 400$), коришћена је следећа једначина [46]

$$Nu_1 = 0,0235 \cdot (Re^{0,8} - 230) \cdot (1,8 \cdot Pr^{0,3} - 0,8) \quad (6.26)$$

у којој је карактеристична геометријска величина унутрашњи пречник цеви, карактеристична брзина је средња брзина струјања флуида кроз цев, а својства флуида се усвајају за средњу температуру флуида. Рејнолдсов број за топлији флуид се рачуна на основу следећег израза

$$Re_1 = \frac{w_1 \cdot d_u \cdot \rho_1}{\mu_1} \quad (6.27)$$

При анализи су занемарени контактни отпори између ребра и цеви, а с обзиром да су размењивачи почели са радом непосредно пред мерења сматрало се да су отпори провођењу топлоте услед запрљања занемарљиво мали.

На основу коефицијента прелаза топлоте са стране хладнијег флуида (на мерењима је то био ваздух) се израчунава Нуселтов број помоћу једначине

$$\text{Nu}_2 = \alpha_2 \cdot \frac{l_2}{\lambda_2} \quad (6.28)$$

где је $(\lambda_2, \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K}))$, коефицијент топлотне проводности ваздуха. Карактеристична дужина l_2 ће бити детаљније размотрена у следећем поглављу.

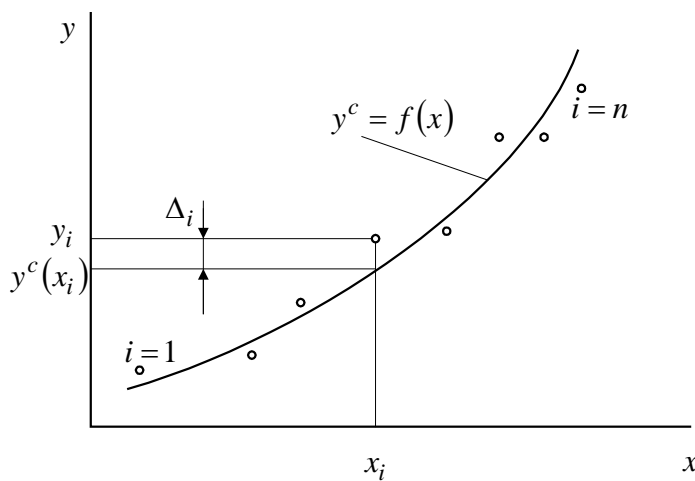
6.2 Статистичко корелисање помоћу метода најмањих квадрата

Метод најмањих квадрата је поступак који се често користи за апроксимацију табеларно задатих функција одговарајућим аналитичким изразима у експлицитном облику. За сваки уређени скуп од n парова (x_i, y_i) за $i = 1, 2, 3 \dots n$ могуће је овом методом одредити зависност општег облика

$$y^c = f(x) \quad (6.29)$$

која апроксимује задату табеларну функцију.

Метод најмањих квадрата може се применити у случају када је y_i измерена (случајна) величина са нормалном расподелом и да је независна променљива x_i тачна (нема грешке мерења). Овим се методом одређује једначина линије која приказује корелационо поље скупа тачака (x_i, y_i) при чему у општем случају не мора да прође ни кроз једну од њих (слика 6.1)



Слика 6.1 Корелационо поље и функција (6.29)

Одступање линије добијене методом најмањих квадрата од измерених вредности за произвољну тачку (x_i, y_i) износи

$$\Delta_i = y_i - y^c(x_i) \quad (6.30)$$

Збир свих одступања за n парова (x_i, y_i) може бити позитиван или негативан, али је збир квадрата свих одступања увек позитиван, односно

$$S = \sum_{i=1}^n \Delta_i^2 \geq 0 \quad (6.31)$$

Метод најмањих квадрата се састоји у томе да се једначина линије $y^c = f(x)$ добије из услова да збир квадрата одступања буде минималан, односно да је

$$S = S_{min} \quad (6.32)$$

Квалитет функционалне зависности добијене методом најмањих квадрата се изражава помоћу статистичких показатеља: корелационог односа, средњег квадратног одступања и максималне грешке из скупа вредности Δ_i .

Ако је i -та вредност зависно променљиве y_i , а i -та вредност зависно променљиве израчуната преко корелационе једначине $y_i^c = f(x_i)$, биће:

- корелациони однос

$$KO = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_i^c)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - y_{av})^2}} \quad (6.33)$$

- средње квадратно одступање

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{y_i - y_i^c}{y_i} \right)^2}{n}} \quad (6.34)$$

- максимална грешка у дијапазону промене независно променљиве

$$MO = \max \left| \frac{y_i - y_i^c}{y_i} \right| \quad (6.35)$$

где је y_{av} средња вредност зависно променљиве y за n задатих парова (x_i, y_i)

$$y_{av} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad (6.36)$$

Овакви статистички показатељи се примењују на зависности било каквог облика. У специјалном случају када је функција $y^c = f(x)$ линеарна, корелациони однос се назива коефицијент корелације и може се израчунати преко израза

$$r_{xy} = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{\left[n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right] \cdot \left[n \cdot \sum_{i=1}^n y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2 \right]}} \quad (6.37)$$

Само у овом случају је $r_{xy} = \theta$.

6.2.1 Линеарна регресија

Поступак одређивања апроксимативне линије методом најмањих квадрата биће илустрован на примеру одређивања линеарне зависности облика

$$y^c = a + b \cdot x \quad (6.38)$$

Збир квадрата појединачних одступања за n парова (x_i, y_i) износи

$$S = \sum_{i=1}^n [y^c(x_i) - y_i]^2 = \sum_{i=1}^n (a + b \cdot x_i - y_i)^2 \quad (6.39)$$

Потребан услов да би се задовољио захтев $S = S_{min}$ је:

$$\frac{\partial S}{\partial a} = 2 \cdot \sum_{i=1}^n (a + b \cdot x_i - y_i) = 0 \quad (6.40)$$

$$\frac{\partial S}{\partial b} = 2 \cdot \sum_{i=1}^n (a + b \cdot x_i - y_i) \cdot x_i = 0 \quad (6.41)$$

одакле се добија систем линеарних једначина:

$$a \cdot n + b \cdot \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n y_i \quad (6.42)$$

$$a \cdot \sum_{i=1}^n x_i + b \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 = \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i \quad (6.43)$$

Решавањем овог система једначина по a и b добија се тражена линеарна зависност (6.38).

6.2.2 Нелинеарна регресија

Поред једначине праве линије методом најмањих квадрата се може добити и једначина сложеније зависности за задати скуп тачака (x_i, y_i) . У инжењерској пракси уобичајено је да се користе следеће нелинеарне зависности:

$$y = a \cdot \exp(b \cdot x) \quad (6.44)$$

$$y = a \cdot x^b \quad (6.45)$$

$$y = a + b \cdot \ln(x) \quad (6.46)$$

$$y = \frac{1}{a + b \cdot x} \quad (6.47)$$

$$y = \frac{x}{a + b \cdot x} \quad (6.48)$$

као и многе друге.

Поступак описан за линеарну регресију може се у овом случају применити на напред набројане зависности, ако се изврши трансформација дате функционалне зависности у линеарни облик. Један од облика функција који је коришћен у дисертацији је

$$y = a \cdot x^b \quad (6.49)$$

потребно је извршити линеаризацију логаритмовањем леве и десне стране израза

$$\ln y = \ln a + b \cdot \ln x \quad (6.50)$$

чиме се добија линеаризовани облик

$$Y = A + b \cdot X \quad (6.51)$$

где су:

$$Y = \ln y \quad (6.52)$$

$$A = \ln a \quad (6.53)$$

$$X = \ln x \quad (6.54)$$

Потребно је напоменути да се сви статистички показатељи (корелациони однос, средње квадратно одступање и максимална грешка) одређују за оригиналну зависност (6.49) и да нема значаја њихово одређивање за прсликану зависност (6.51).

7 АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА

У оквиру дисертације анализирани су подаци за пад притиска и интензитет размене топлоте који су добијени на основу сопственог експерименталног рада, као и доступни подаци из отворене литературе. Поред експерименталних података, анализиране су и доступне корелације за пад притиска и интензитет размене топлоте које су објавили други аутори. На тај начин формирана је база са великим бројем података чији је преглед дат у табели 7.1.

Поред наведених, постоји и неколико сетова експерименталних мерења који нису анализирани у оквиру ове дисертације због сумње у поузданост мерне технике која је коршћена или сумње у поузданост методологије обраде резултата мерења.

Табела 7.1 Табеларни преглед аутора који су објавили експерименталне податке или корелације за пад притиска и/или интензитет размене топлоте

Реф.	Аутор	Година	Организација
[17]	Jameson и Schenectady	1945.	General Electric Company
[19]	Trane Company Bulletin	1953.	Trane Company
[20]	В. Ф. Юдин	1985.	Ленинградский технологический институт
[21]	Eckels и Rabas	1985.	Westinghouse Electric Corporation
[22]	He FaJiang, Cao WeiWu и Yan Ping	2012.	University of Shanghai for Science and Technology
[23]	Gunter и Shaw	1945.	American Locomotive Company
[28]	Briggs и Young	1963.	University of Michigan
[29]	Robinson и Briggs	1964.	University of Michigan
[30]	Nir	1991.	Unique Solutions of America

7.1 Карактеристичне величине и бездимензиони бројеви

Брзина струјања флуида са стране оребрених цеви сведена на попречни пресек канала у ком је смештен размењивач се назива фасадна брзина, и дефинисана је у облику

$$w_{kan} = \frac{\dot{V}}{W \cdot H} \quad (7.1)$$

где су:

- \dot{V} (m^3/s), запремински проток флуида;
- W (m), ширина канала (размењивача топлоте);
- H (m), висина канала (размењивача топлоте).

Карактеристична брзина струјања је брзина сведена на порозни пресек размењивача

$$w_\varepsilon = \frac{w_{kan}}{\varepsilon} \quad (7.2)$$

Карактеристична геометријска величина је хидраулички пречник

$$d_h = \frac{4 \cdot \varepsilon}{s_v} \quad (7.3)$$

Пад притиска при струјању флуида преко снопа оребрених цеви има следећи облик

$$\Delta p = \xi \cdot \frac{L}{d_h} \cdot \frac{\rho \cdot w_\varepsilon^2}{2} \quad (7.4)$$

Помоћу карактеристичне брзине и хидрауличног пречника може се дефинисати Рејнолдсов број у следећем облику

$$\text{Re} = \frac{w_\varepsilon \cdot d_h}{\nu} \quad (7.5)$$

као и Нуселтов број

$$\text{Nu} = \frac{\alpha}{\lambda} \cdot d_h \quad (7.6)$$

Различити аутори су приликом дефинисања бездимензионих бројева користили различите карактеристичне величине (спољни пречник цеви, хидраулички пречник сведен на површинску порозност, брзина флуида сведена на минимални попречни пресек, итд.). Да би могли да се пореде и анализирају експериментални подаци свих аутора, потребно је извршити прерачунавање свих бездимензионих бројева и осталих критеријалних величина на облике дефинисане једначинама (7.1) ÷ (7.6).

7.1.1 Прерачунавање бездимензионих бројева аутора Jameson и Schenectady [17]

Као што је напоменуто у поглављу 4.1, у књизи [18] су обрађени експериментални подаци из чланка [17] са прерачунатим карактеристичним величинама. Прерачунавање на Рејнолдсов број дефинисан једначином (7.5) се може извршити на следећи начин

$$\text{Re}_{JS} = \frac{w_{JS} \cdot d_{eJS} \cdot \rho}{\mu} \quad (7.7)$$

$$\frac{\text{Re}_{JS}}{w_{JS} \cdot d_{eJS}} = \frac{\text{Re}}{w_{\varepsilon} \cdot d_h} \quad (7.8)$$

$$\text{Re} = \text{Re}_{JS} \cdot \frac{d_h}{d_{eJS}} \cdot \frac{w_{\varepsilon}}{w_{JS}} = \text{Re}_{JS} \cdot \frac{s_V}{4 \cdot \varepsilon_{pov}} \cdot \left(\frac{\frac{w_{kan}}{\varepsilon}}{\varepsilon_{pov}} \right) \quad (7.9)$$

одакле се добија

$$\text{Re} = \text{Re}_{JS} \quad (7.10)$$

На сличан начин може се пронаћи веза између коефицијената трења. Пад притиска према номенклатури дефинисаној у чланку [17] има следећи облик

$$\Delta p = \xi_{JS} \cdot \frac{L}{d_{eJS}} \cdot \frac{\rho \cdot w_{JS}^2}{2} \quad (7.11)$$

Поређењем израза (7.8) са изразом (7.4) добија се једнакост

$$\xi_{JS} \cdot \frac{L}{d_{eJS}} \cdot \frac{\rho \cdot w_{JS}^2}{2} = \xi \cdot \frac{L}{d_h} \cdot \frac{\rho \cdot w_{\varepsilon}^2}{2} \quad (7.12)$$

одакле следи

$$\xi = \xi_{JS} \cdot \frac{d_h}{d_{eJS}} \cdot \left(\frac{w_{JS}}{w_{\varepsilon}} \right)^2 = \xi_{JS} \cdot \frac{s_V}{4 \cdot \varepsilon_{pov}} \cdot \left(\frac{\frac{w_{kan}}{\varepsilon_{pov}}}{\varepsilon} \right)^2 \quad (7.13)$$

Коначно, прерачуната једначина за коефицијент трења има облик

$$\xi = \xi_{JS} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{pov}} \right)^3 \quad (7.14)$$

Да би се одредила веза између параметара којима се одређује интензитет размене топлоте потребно је извршити прерачунавање Колбурновог фактора на Нуселтов број дефинисан једначином (7.6). Прерачунавање се може извршити на следећи начин

$$\text{Nu}_{JS} = \frac{\alpha}{\lambda} \cdot d_{eJS} \quad (7.15)$$

$$\text{Nu} = \text{Nu}_{JS} \cdot \frac{d_h}{d_{eJS}} = \text{Nu}_{JS} \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{pov}} \quad (7.16)$$

Када се обе стране једначине поделе са $\text{Pr}^{1/3}$ добија се израз

$$\frac{\text{Nu}}{\text{Pr}^{1/3}} = \frac{\text{Nu}_{JS}}{\text{Pr}^{1/3}} \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{pov}} \quad (7.17)$$

С обзиром да је на основу једначине (4.8)

$$\text{St}_{JS} \cdot \text{Pr}^{2/3} = \frac{\text{Nu}_{JS}}{\text{Pr}^{1/3} \cdot \text{Re}_{JS}} \quad (7.18)$$

може се, комбинацијом израза (7.17) и (7.18), добити следећа једнакост

$$\frac{\text{Nu}}{\text{Pr}^{1/3}} = \text{St}_{JS} \cdot \text{Pr}^{2/3} \cdot \text{Re}_{JS} \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{pov}} \quad (7.19)$$

7.1.2 Прерачунавање бездимензионих бројева објављених у Trane Company Bulletin [19]

С обзиром да су бездимензиони бројеви у [19] дефинисани истим изразима од (4.4) до (4.8), прерачунате величине имају исте облике као изрази (7.10), (7.14), (7.16) и (7.19), односно:

$$\text{Re} = \text{Re}_{Tr} \quad (7.20)$$

$$\xi = \xi_{Tr} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{pov}} \right)^3 \quad (7.21)$$

$$\text{Nu} = \text{Nu}_{Tr} \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{pov}} \quad (7.22)$$

$$\frac{\text{Nu}}{\text{Pr}^{1/3}} = \text{St}_{Tr} \cdot \text{Pr}^{2/3} \cdot \text{Re}_{Tr} \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{pov}} \quad (7.23)$$

7.1.3 Прерачунавање бездимензионих бројева аутора В. Ф. Юдин [20]

Аутор је у прилогу књиге [20], поред свих геометријских података о размењивачима топлоте на којима је обављао експерименте, објавио и велики број директно мерених експерименталних величина. Рејнолдсов број је дефинисан у следећем облику

$$\text{Re}_J = \frac{w_J \cdot d_{eJ} \cdot \rho}{\mu} \quad (7.24)$$

где су:

- d_{eJ} (m), карактеристична величина која је једнака спољном пречнику цеви, односно $d_{eJ} = d_s$
- w_J (m/s), брзина флуида са стране ребара сведена на минималну проточну површину.

Поређењем израза (7.24) и израза (7.5) добија се следећа једнакост

$$\frac{\text{Re}_J}{w_J \cdot d_{eJ}} = \frac{\text{Re}}{w_\varepsilon \cdot d_h} \quad (7.25)$$

$$\text{Re} = \text{Re}_J \cdot \frac{d_h}{d_s} \cdot \frac{w_\varepsilon}{w_J} \quad (7.26)$$

одакле следи

$$\text{Re} = \text{Re}_J \cdot \frac{d_h}{d_s} \cdot \frac{\varepsilon_{pov}}{\varepsilon} \quad (7.27)$$

С обзиром да је аутор у [20] приказао вредности пада притиска ваздуха при струјању преко снопа завојно оребрених цеви, коефицијент трења се може израчунати на следећи начин

$$\xi = \frac{\Delta p \cdot d_h}{N_{cl} \cdot s_l} \cdot \frac{2}{\rho \cdot w_\varepsilon^2} \quad (7.28)$$

где су:

- N_{cl} , број редова цеви у правцу струјања ваздуха;
- s_l (m), подужни корак цеви.

Производ чланова N_{cl} и s_l представља укупну дужину размењивача у правцу струјања ваздуха, односно

$$N_{cl} \cdot s_l = L \quad (7.29)$$

Коефицијент прелаза топлоте аутор је свео на спољну површину глатке цеви као карактеристичну површину, па је

$$\alpha_J = \frac{Q}{\Delta t \cdot S_{sp}} \quad (7.30)$$

где је S_{sp} (m^2) спољна површина глатке цеви.

Нуселтов број је дефинисан у облику

$$Nu_J = \frac{\alpha_J}{\lambda} \cdot d_{eJ} \quad (7.31)$$

Поређењем једначина (7.6) и (7.31) добија се следећа једнакост

$$Nu = Nu_J \cdot \frac{d_h}{d_{eJ}} \cdot \frac{\alpha}{\alpha_J} = Nu_J \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{pov}} \cdot \frac{\frac{Q}{\Delta t \cdot S_S}}{\frac{Q}{\Delta t \cdot S_{sp}}} \quad (7.32)$$

односно

$$Nu = Nu_J \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{pov}} \cdot \frac{d_{eJ} \cdot \pi}{(S_r + S_{mr})} \quad (7.33)$$

где је $S_S = S_r + S_{mr}$ (m^2/m) укупна површина оребрене цеви сведена на дужни метар цеви.

7.1.4 Прерачунавање бездимензионих бројева аутора Eckels и Rabas [21]

Као карактеристичну величину у Рејнолдсовом броју аутори су усвојили пречник цеви у корену ребра (“Collar Diameter”)

$$Re_{ER} = \frac{w_{ER} \cdot d_{kr} \cdot \rho}{\mu} \quad (7.34)$$

где је

$$w_{ER} = \frac{w_{kan}}{\varepsilon_{pov}} \quad (7.35)$$

брзина сведена на минималну проточну површину.

Прерачунавање на Рејнолдсов број дефинисан једначином (7.5) се може извршити на следећи начин

$$\frac{\text{Re}_{ER}}{w_{ER} \cdot d_{kr}} = \frac{\text{Re}}{w_{\varepsilon} \cdot d_h} \quad (7.36)$$

одакле се добија

$$\text{Re} = \text{Re}_{ER} \cdot \frac{\varepsilon_{pov}}{\varepsilon} \cdot \frac{d_{kr}}{d_{\varepsilon}} \quad (7.37)$$

Пад притиска према номенклатури дефинисаној у чланку [21] има следећи облик

$$\Delta p = 2 \cdot f \cdot N_{cl} \cdot \frac{G^2}{\rho} \quad (7.38)$$

где су:

- f , Фанингов фактор трења;
- N_{cl} , број редова цеви у правцу струјања ваздуха;

$$N_{cl} = \frac{L}{s_l}$$

- L (m), укупна дужина размењивача у правцу струјања ваздуха;
- G ($\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$), масена брзина.

Масена брзина се израчунава на следећи начин

$$G = \rho \cdot w_{ER} \quad (7.39)$$

Поређењем израза (7.38) и (7.39) са изразом (7.4) добија се једнакост

$$\xi = 4 \cdot f \cdot \frac{d_{\varepsilon}}{s_l} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{pov}} \right)^2 \quad (7.40)$$

7.1.5 Прерачунавање бездимензионих бројева аутора Gunter и Shaw [23]

Аутори су у чланку [23] објавили корелацију за коефицијент трења. Да би могао да се оцени квалитет предложене корелације, потребно је извршити прерачунавање свих критеријалних величина на величине дефинисане у чланку [23].

Карактеристична величина у Рејнолдсовом броју је хидраулички пречник који је представљен односом слободне проточне запремине (запремине која се добија када се од укупне запремине размењивача топлоте одузме запремина коју заузимају оребрене цеви) и укупне површине за размену топлоте, односно

$$D_{eGS} = 4 \cdot \frac{s_l \cdot s_t \cdot s_r - \frac{\pi}{4} \cdot (d_r^2 \cdot \delta_r - d_s^2 \cdot (s_r - \delta_r))}{\pi \cdot \left(d_s \cdot (s_r - \delta_r) + \frac{d_r^2 - d_s^2}{2} + d_r \cdot \delta_r \right)} \quad (7.41)$$

Рејнолдсов број је дефинисан изразом

$$\text{Re}_{GS} = \frac{w_{GS} \cdot D_{eGS} \cdot \rho}{\mu} \quad (7.42)$$

где је

$$w_{GS} = \frac{W_{kan}}{\varepsilon_{pov}} \quad (7.43)$$

брзина сведена на минималну проточну површину.

Поређењем једначина (7.42) и (7.5) добија се веза између Рејнолдсових бројева

$$\text{Re}_{GS} = \text{Re} \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{pov}} \cdot \frac{D_{eGS}}{d_\varepsilon} \quad (7.44)$$

Пад притиска је дефинисан следећим изразом

$$\Delta p = \xi_{GS} \cdot \frac{L}{D_{eGS}} \cdot \frac{\rho \cdot w_{GS}^2}{2} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_g} \right)^{0,14} \cdot \left(\frac{D_{eGS}}{s_t} \right)^{-0,4} \cdot \left(\frac{s_l}{s_t} \right)^{-0,8} \quad (7.45)$$

Поређењем израза (7.45) и (7.4) добија се једнакост

$$\xi_{GS} = \xi \cdot \frac{D_{eGS}}{d_h} \cdot \left(\frac{\varepsilon_{pov}}{\varepsilon} \right)^2 \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_g} \right)^{0,14} \cdot \left(\frac{D_{eGS}}{s_t} \right)^{-0,4} \cdot \left(\frac{s_l}{s_t} \right)^{-0,8} \quad (7.46)$$

Предложена корелација за пад притиска при струјању ваздуха преко снопа глатких и оребрених цеви, у зависности од вредности Рејнолдсовог броја, је дата изразом:

$$\frac{\xi_{GS}}{2} = 90 \cdot \text{Re}_{GS}^{-1}, \text{ за } \text{Re}_{GS} < 200 \quad (7.47)$$

$$\frac{\xi_{GS}}{2} = 0,96 \cdot \text{Re}_{GS}^{-0,145}, \text{ за } \text{Re}_{GS} > 200 \quad (7.48)$$

7.1.6 Прерачунавање бездимензионих бројева аутора Briggs и Young [28]

Аутори су у чланку [28] предложили корелацију за прелаз топлоте при струјању ваздуха преко снопа оребрених цеви у следећем облику

$$St_{BY} \cdot Pr^{2/3} \cdot \left(\frac{s_l}{h_r} \right)^{-0,296} = 0,1378 \cdot Re_{BY}^{-0,282} \quad (7.49)$$

где су:

- s_l (m), корак ребра;
- h_r (m), висина ребра;
- St_{BY} , Стентонов број.

Стентонов број је дефинисан изразом

$$St_{BY} = \frac{\alpha}{G \cdot c_p} \quad (7.50)$$

где је α (W/(m²·K)) осредњени коефицијент прелаза топлоте са оребрених цеви на ваздух.

Карактеристична величина у Рејнолдсовом броју је спољни пречник цеви, а карактеристична брзина је брзина сведена на минималну проточну површину

$$Re_G = \frac{w_{BY} \cdot d_{eBY} \cdot \rho}{\mu} \quad (7.51)$$

Прерачунавање Рејнолдсовог броја се врши помоћу следеће једначине

$$Re_{BY} = Re \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{пов}} \cdot \frac{d_{eBY}}{d_\varepsilon} \quad (7.52)$$

Прерачунавање једначине на основу које се може оценити интензитет размене топлоте се врши на сличан начин описан у поглављу 4.1.1, и дата је у следећој форми

$$\frac{Nu_{BY}}{Re_{BY} \cdot Pr^{1/3}} \cdot \left(\frac{s_l}{h_r} \right)^{-0,296} = 0,1378 \cdot Re_{BY}^{-0,282} \quad (7.53)$$

7.1.7 Прерачунавање бездимензионих бројева аутора Robinson и Briggs [29]

Предложена корелација за пад притиска при струјању флуида преко снопа оребрених цеви има облик

$$f \cdot \left(\frac{s_t}{d}\right)^{0,927} \cdot \left(\frac{s_t}{s_d}\right)^{-0,515} = 9,465 \cdot \text{Re}_{RB}^{-0,316} \quad (7.54)$$

Дијагонални корак цеви s_d је дефинисан следећом једначином

$$s_d = \sqrt{\frac{s_t^2}{4} + s_l^2} \quad (7.55)$$

Остале непознате величине су дефинисане у поглављу 4.6.3.

Пад притиска у функцији од Фанинговог коефицијента трења f има облик

$$\Delta p = 2 \cdot f \cdot \frac{L}{s_l} \cdot \rho \cdot w_{RB}^2 \quad (7.56)$$

где је w_{RB} (m/s) брзина сведена на минималну проточну површину.

Поређењем израза (7.56) и израза (7.4) добија се прерачуната вредност коефицијента трења који има следећи облик

$$f = \frac{\xi}{4} \cdot \frac{s_l}{d_\varepsilon} \cdot \left(\frac{\varepsilon_{pov}}{\varepsilon}\right) \quad (7.57)$$

7.1.8 Прерачунавање бездимензионих бројева аутора Nir [30]

Аутор је у чланку [30] предложио корелацију за прелаз топлоте при струјању флуида преко снопа цеви са равним и разрезаним ребрима у следећем облику

$$\text{St}_N \cdot \text{Pr}^{2/3} = 1,745 \cdot \text{Re}_N^{-0,4} \cdot W_N^{-2/3} \cdot R_b^{-0,4} \cdot K_{z,h} \quad (7.58)$$

као и корелација за пад притиска при струјању флуида преко снопа цеви са равним ребрима у облику

$$f = 3 \cdot \text{Re}_N^{-0,25} \cdot W_N^{-0,8} \cdot K_{z,p} \quad (7.59)$$

Карактеристична величина у Рејнолдсовом броју је хидраулички пречник, а карактеристична брзина је брзина сведена на минималну проточну површину

$$\text{Re}_N = \frac{G \cdot d_{eN}}{\mu} = \frac{w_N \cdot d_{eN} \cdot \rho}{\mu} \quad (7.60)$$

Хидраулички пречник има следећи облик

$$d_{eN} = \frac{4 \cdot d_r}{W_N} \quad (7.61)$$

W_N представља однос површине за размену топлоте оребрене цеви јединичне дужине и слободне проточне површине са стране оребрења дефинисан једначином

$$W_N = \frac{S_r + S_{mr}}{S_{min}} \quad (7.62)$$

Површина ребара по јединици дужине цеви износи:

$$S_r = \pi \cdot N_{cl} \cdot \left[(d_r - d_s) \cdot \sqrt{\left(\frac{d_r + d_s}{2}\right)^2 + \left(\frac{s_r}{\pi}\right)^2} + \delta_r \cdot \sqrt{d_r^2 + \left(\frac{s_r}{\pi}\right)^2} \right] \quad (7.63)$$

док је међуребарна површина по јединици дужине цеви дефинисана изразом:

$$S_{mr} = \pi \cdot d_s \cdot \left[1 - N_l \cdot \delta_r \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{s_r}{\pi \cdot d_s}\right)^2} \right] \quad (7.64)$$

Минимална површина

$$S_{min} = \frac{(s_r - \delta_r) \cdot (s_t - d_s) + (s_t - d_r) \cdot \delta_r}{s_l \cdot N_l} \quad (7.65)$$

где је N_{cl} број цеви у правцу струјања флуида.

Поређењем једначина (7.61) и (7.5) добија се веза између Рејнолдсових бројева:

$$\text{Re}_N = \text{Re} \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{пов}} \cdot \frac{d_{eN}}{d_\varepsilon} \quad (7.66)$$

Бездимензиона величина R_b је дефинисана следећом једначином

$$R_b = \frac{s_t - d_r + (d_r - d_s) \cdot (1 - \delta_r \cdot N_r)}{(d_r - d_s) \cdot (1 - \delta_r \cdot N_r)} \quad (7.67)$$

где је N_r број ребара по јединичној дужини.

Карактеристична величина у Нуселтовом броју је хидраулички пречник d_{eN} , па се прерачунавање Нуселтовог броја може извршити на следећи начин

$$\text{Nu}_N = \text{Nu} \cdot \frac{d_\varepsilon}{d_{eN}} \quad (7.68)$$

Коефицијент трења аутор је дефинисао на следећи начин

$$f_N = \frac{2 \cdot \Delta p \cdot \rho}{W_N \cdot N_{cl} \cdot G^2} \quad (7.69)$$

где је N_{cl} број редова цеви, а G масена брзина сведена на минималну проточну површину. Поређењем израза (7.69) и (7.4) добија се веза између коефицијената трења

$$f_N = \frac{\xi}{W_N} \cdot \frac{s_l}{d_\varepsilon} \cdot \left(\frac{\varepsilon_{pov}}{\varepsilon} \right) \quad (7.70)$$

7.2 Опсег анализираних података и број анализираних радних режима

У табели 7.2.1 је приказан опсег анализираних података којим су обухваћени сви експериментални подаци као и резултати сопствених мерења, при чему су сви експериментални подаци прерачунати на величине дефинисане у Поглављу 4.1. У табели 7.2.2 је дат број анализираних радних режима сваког од аутора.

Табела 7.2.1 Опсег анализираних података

Вредност	Минимална	Максимална
Re	431	1 071 982
Nu/Pr ^{1/3}	4	6758
ξ	0,1	11,4
N_{cl}	2	7
N_r	62,5	500
δ_r (mm)	0,2	1,5
d_{kr} (mm)	10,5	34,6
s_l (mm)	20,4	112
s_t (mm)	24,8	132,8

Табела 7.2.2 Број анализираних радних режима

База података	Прилог	Број радних режима	
		Пад притиска	Прелаз топлоте
Сопствена мерења	П1	115	90
Jameson и Schenectady	П2	40	40
Trane Company Bulletin	П3	55	38
В. Ф. Юдин	П4	689	771
Eckels и Rabas	П5	5	11
He FaJiang, Cao WeiWu и Yan Ping	П6	22	22
УКУПНО		926	972

7.3 Корелација за коефицијент отпора при струјању ваздуха преко снопа завојно оребрених цеви

Облик корелације за коефицијент отпора при струјању ваздуха преко снопа завојно оребрених цеви је претпостављен у следећем облику

$$\xi = (A + B \cdot \text{Re}^C) \cdot \left(\frac{S_s}{S_{mr}} \right)^D \cdot \varepsilon^E \quad (7.71)$$

Облик једначине (7.71) и бездимензиони однос површина S_s / S_{mr} су раније употребљени у чланцима [47] и [48] за формирање корелације за израчунавање отпора приликом попречног струјања ваздуха преко снопа оребрених цеви која је дала добра слагања са експерименталним вредностима.

Параметар A у једначини (7.71) се односи на пад притиска услед вискозног трења, а параметар B је последица турбуленције. Значење ових параметара је дао Ergun у чланку [49] анализирајући пад притиска при струјању гаса кроз слој порозног материјала или испуну. Значење параметара A и B је потврдио и Шашић у књизи [50].

Вредности параметара су добијени методом најмањих квадрата, и приказани су у табели 7.3.1. У трећем, четвртој и петом реду табеле 7.3.1 је испитиван утицај параметара A и E на корелацију са циљем да се провери могућност да се њиховим избегавањем из једначине (7.7.1) добије корелација која ће имати једноставнији облик уз задовољавајуће статистичке параметре. У табели су приказани и средње квадратно одступање (SD) и корелациони однос (KO) као статистички показатељи помоћу којих се оцењује квалитет корелације.

Табела 7.3.1 Параметри за корелацију (7.71)

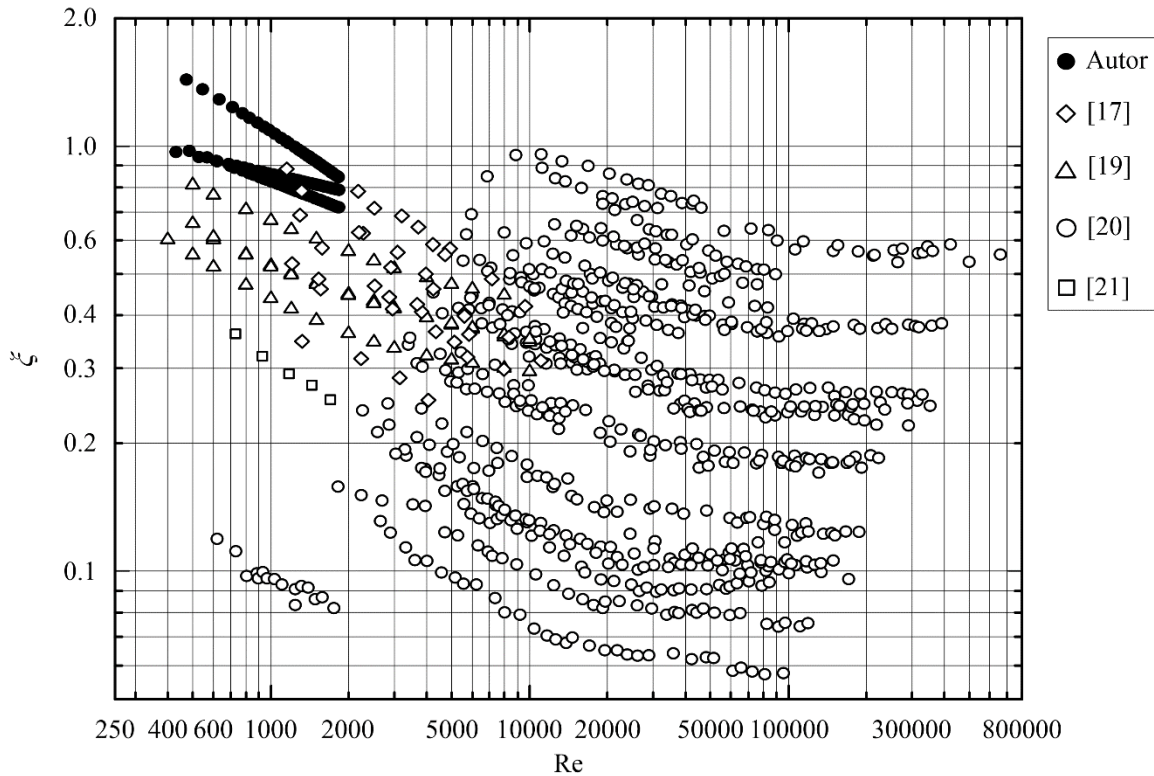
A	B	C	D	E	$SD, \%$	$KO, \%$
1,59	101	-0,52	-0,71	1,2	20,9	95,1
1,37	98	-0,51	-0,83	0	24,8	93,3
0	15,14	-0,18	-0,72	1,23	22,1	93,9
0	16,64	-0,20	-0,85	0	25,7	91,4

На основу приказане анализе, може се закључити да се утицај слободног члана A не треба занемарити. Утицај слободног члана на статистичке показатеље корелације сугерисано је и раније у истраживањима објављеним у [51] и [52].

Усвојена корелација за израчунавање отпора приликом попречног струјања ваздуха преко снопа завојно оребрених цеви има следећи облик

$$\xi = (1,59 + 101 \cdot \text{Re}^{-0,52}) \cdot \left(\frac{S_s}{S_{mr}} \right)^{-0,71} \cdot \varepsilon^{1,2} \quad (7.72)$$

На дијаграму на слици 7.1 приказане су вредности коефицијента отпора струјању у функцији од Рејнолдсовог броја за све анализираних радних режима, а на дијаграму на слици 7.2 приказана је корелација (7.72) примењена на све расположиве експерименталне податке за коефицијенте отпора струјању.

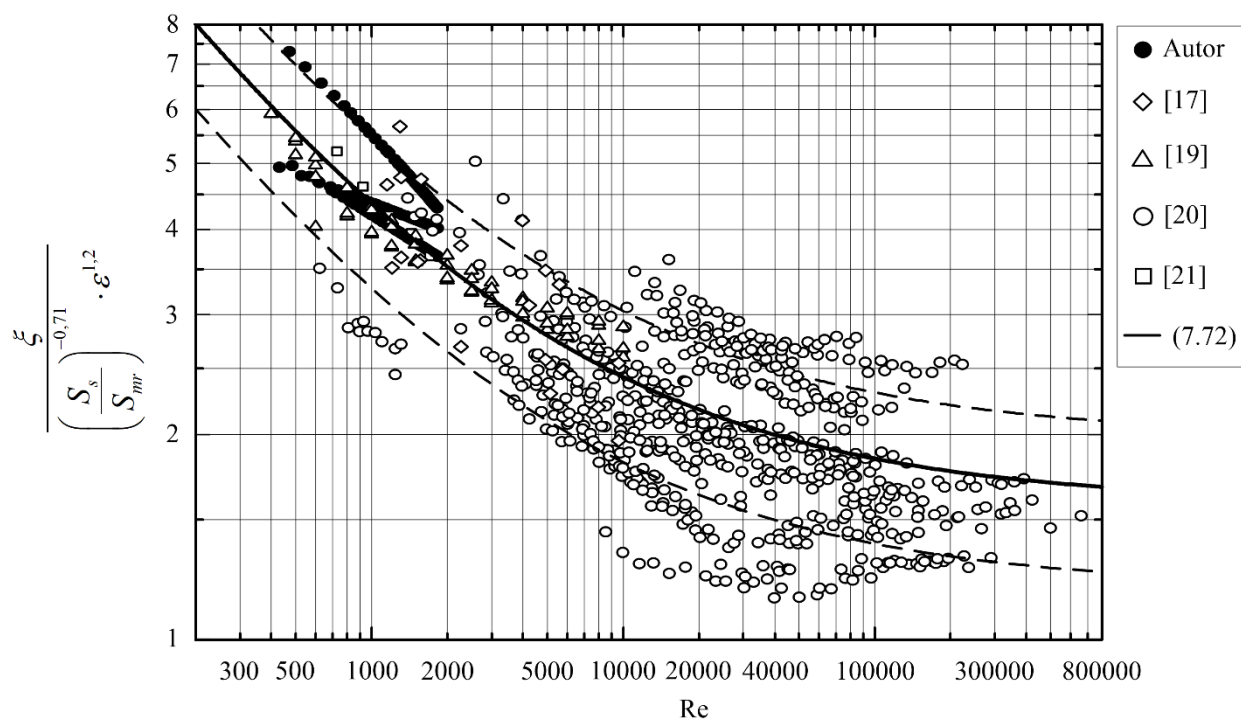


Слика 7.1 Коефицијент отпора струјању у функцији Рејнолдсовог броја

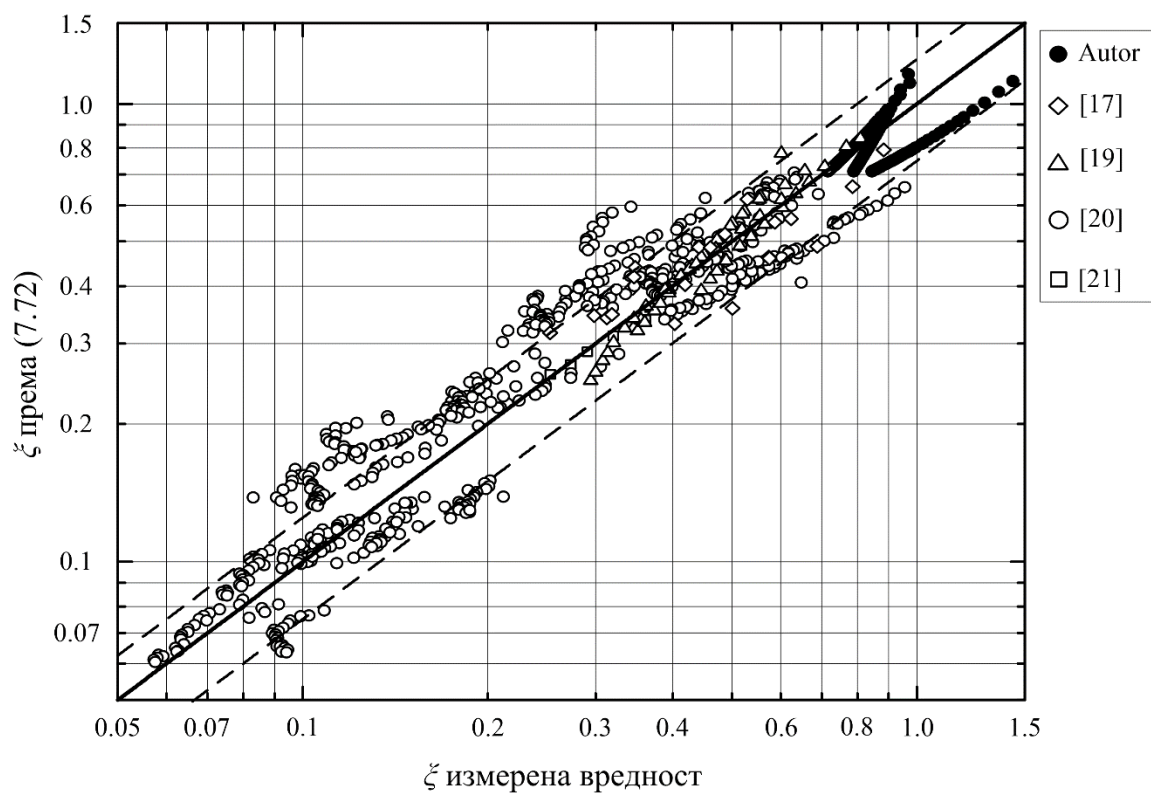
Као што је већ напоменуто, с обзиром да аутори у чланку [22] нису дефинисали карактеристичну величину у Рејнолдсовом и Нуселтовом броју као ни карактеристичну брзину струјања, њихови експериментални подаци нису приказани на дијаграмима.

На дијаграму на слици 7.3 је приказан паритетни дијаграм једначине (7.72) у односу на измерене вредности. На сликама 7.2 и 7.3 испрекиданом линијом је представљено корелационо поље у опсегу $\pm 25\%$ у односу на једначину (7.72).

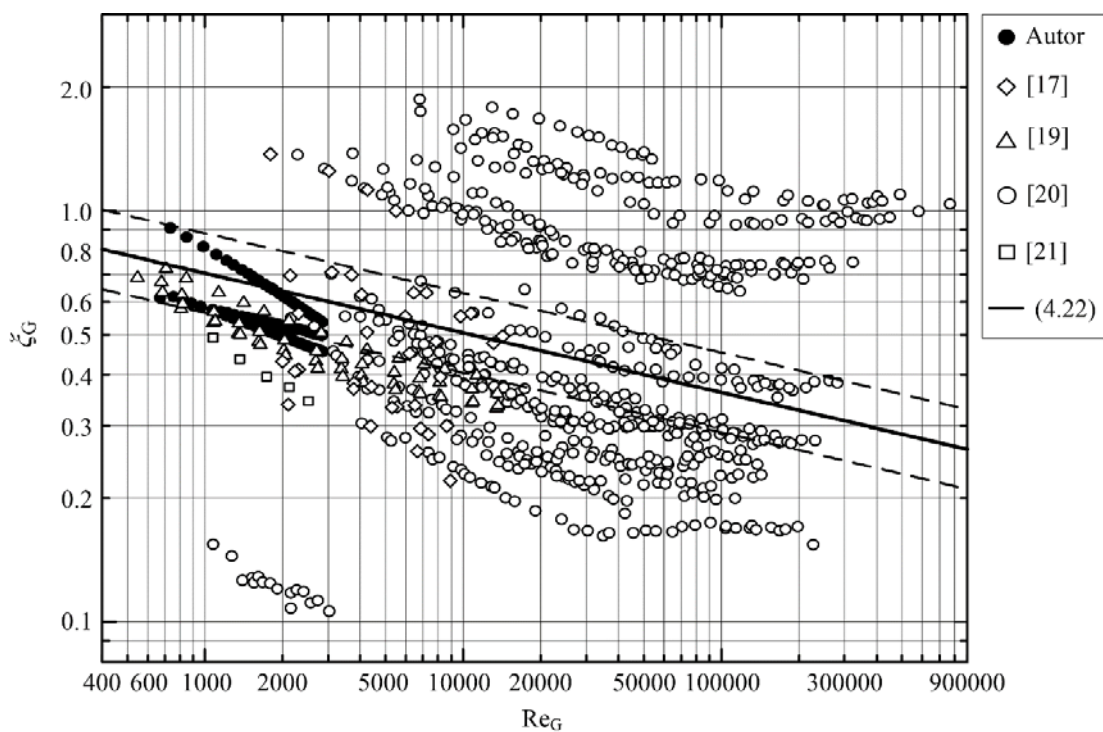
На дијаграмима на сликама 7.4 и 7.5 приказане су корелације (4.22) и (4.29), које су објавили аутори у чланцима [23] и [29] респективно, а које су примењене на расположиве експерименталне податке. Пре тога је извршено прерачунавање карактеристичних величина према поступку описаном у поглављу 7.1.5, односно 7.1.7. У табели 7.3.2 су приказани основни статистички параметри поменутих корелација.



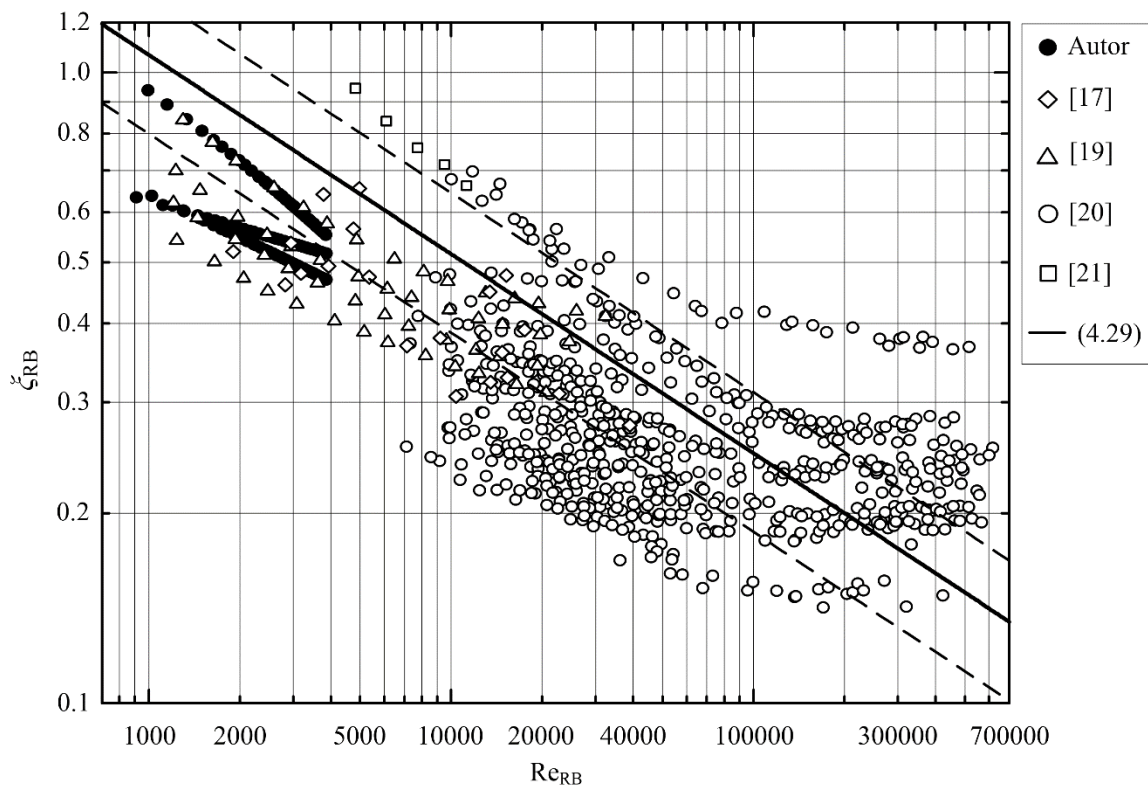
Слика 7.2 Корелација (7.72) примењена на расположиве експерименталне податке



Слика 7.3 Паритетни дијаграм једначине (7.72) у односу на измерене вредности



Слика 7.4 Корелација (4.22) примењена на расположиве експерименталне податке



Слика 7.5 Корелација (4.29) примењена на расположиве експерименталне податке

Табела 7.3.2 Параметри за корелације (4.22) и (4.29)

Аутор	Референца	Корелација	<i>SD</i> , %	<i>KO</i> , %
Gunter и Shaw	[23]	(4.22)	85,5	0
Robinson и Briggs	[29]	(4.29)	34,7	0

С обзиром на веома узак опсег у ком важи корелација за пад притиска аутора [30], и да највећи број експерименталних података испада из неког од опсега дефинисаних у поглављу 4.6.4, није могуће применити корелацију (4.31) на расположиве експерименталне податке.

7.4 Корелација за интензитет прелаза топлоте при струјању ваздуха преко цевног снопа са завојним оребрењем

Општи облик корелације за интензитет прелаза топлоте при струјању ваздуха преко снопа завојно оребрених цеви је претпостављен у истом облику као и у случају коефицијента отпора струјању

$$Nu = \left(A + B \cdot Re^C \right) \cdot \left(\frac{S_s}{S_{mr}} \right)^D \cdot \varepsilon^E \cdot Pr^{1/3} \quad (7.73)$$

Облик једначине (7.73) је раније коришћен у чланцима [47] и [53] за формирање корелације за интензитет прелаза топлоте при струјању ваздуха преко оребреног цевног снопа.

Вредности параметара су добијени методом најмањих квадрата и приказани су у табели 7.4.1. У табели су приказани и средње квадратно одступање (*SD*) и корелациони однос (*KO*) као статистички показатељи помоћу којих се оцењује квалитет корелације.

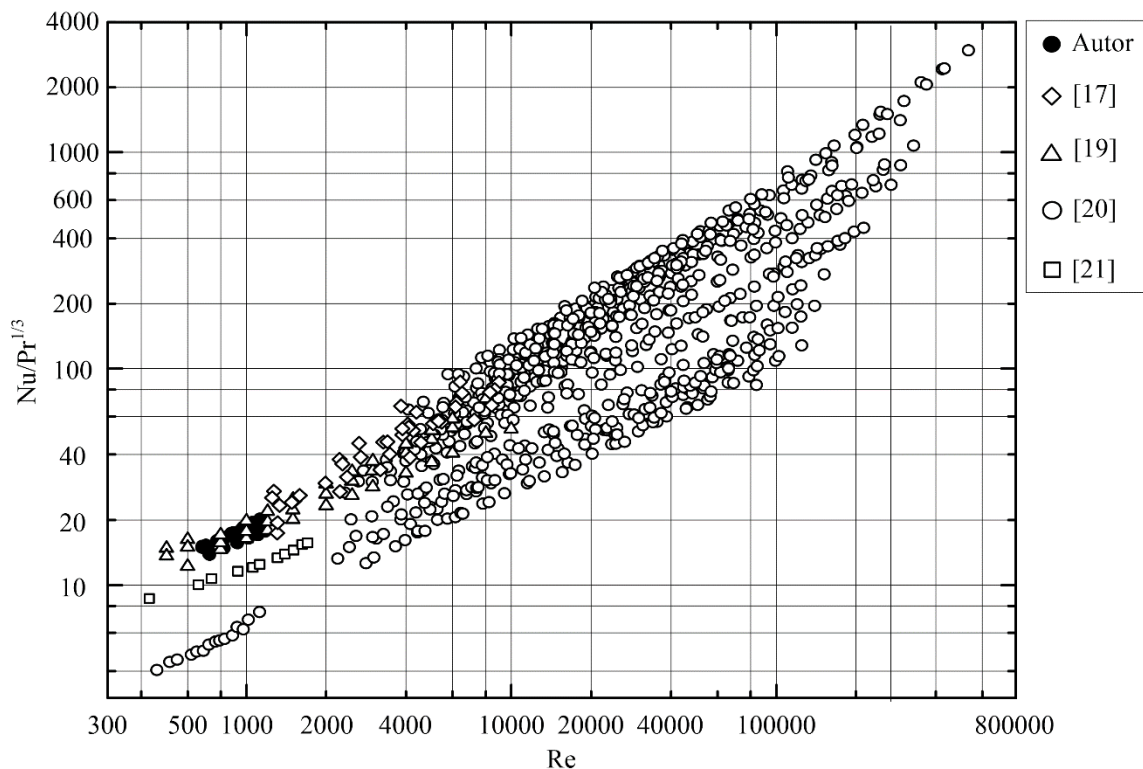
Табела 7.4.1 Параметри за корелацију (7.73)

<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	<i>SD</i> , %	<i>KO</i> , %
15,57	0,32	0,735	-0,48	0,89	20,60	98,20
11,95	0,35	0,73	-0,63	0	23,50	97,40
0	0,56	0,68	-0,48	0,82	21,20	97,00
0	0,54	0,69	-0,63	0	23,90	97,50

За разлику од корелације за коефицијент отпора струјању, параметар *A* нема значајнијег утицаја у корелацији (7.73). Усвојена корелација за израчунавање интензитета прелаза топлоте приликом попречног струјања ваздуха преко снопа завојно оребрених цеви има следећи облик

$$Nu = 0,56 \cdot Re^{0,68} \cdot \left(\frac{S_s}{S_{mr}} \right)^{-0,48} \cdot \varepsilon^{0,82} \cdot Pr^{1/3} \quad (7.74)$$

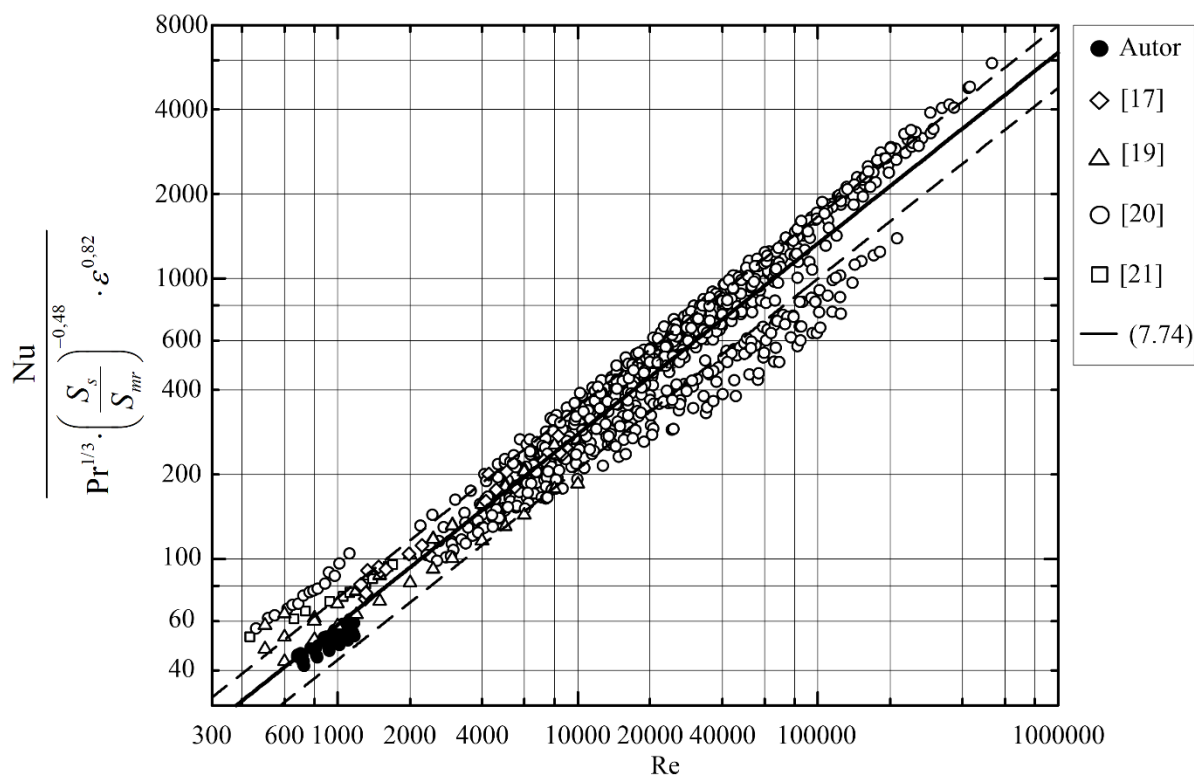
На дијаграму на слици 7.6 приказане су вредности Нуселтовог у функцији од Рејнолдсовог броја за све анализиране радне режиме. На дијаграму на слици 7.7 приказана је корелација (7.74) примењена на све расположиве експерименталне податке за интензитет прелаза топлоте. Испрекиданом линијом је представљено корелационо поље у опсегу $\pm 25\%$.



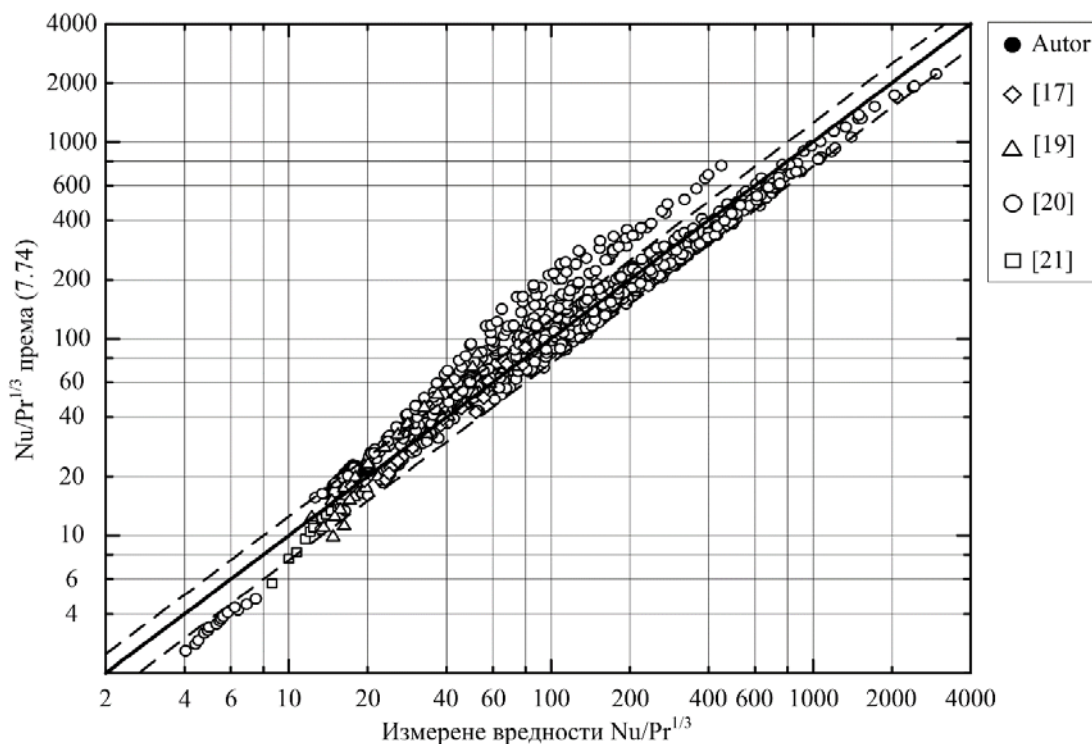
Слика 7.6 Нуселтов број у функцији од Рејнолдсовог броја

На дијаграму на слици 7.8 је приказан паритетни дијаграм једначине (7.74) у односу на измерене вредности.

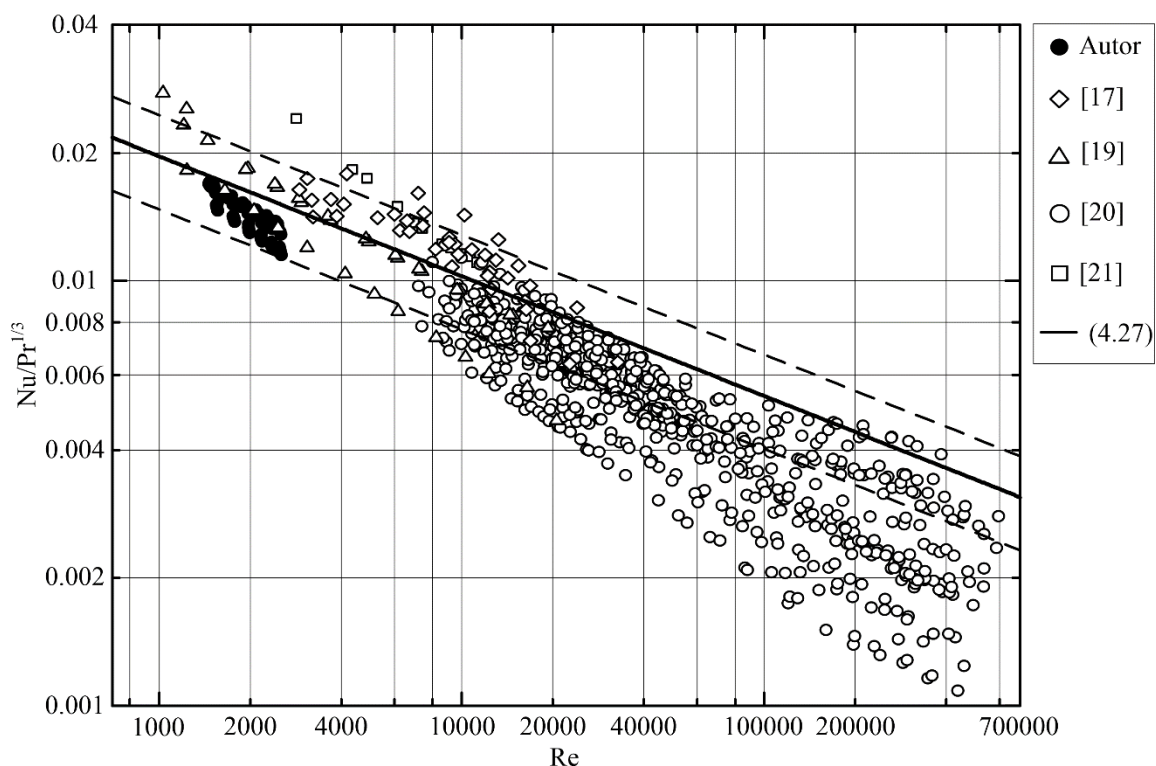
На дијаграму на слици 7.9 приказана је корелација (4.27) коју су објавили аутори у чланку [28], а која је примењена на расположиве експерименталне податке. Пре тога је извршено прерачунавање карактеристичних величина према поступку описаном у поглављу 7.1.6. У табели 7.4.2 су приказани основни статистички параметри поменуте корелације.



Слика 7.7 Корелација (7.74) примењена на расположиве експерименталне податке



Слика 7.8 Паритетни дијаграм једначине (7.74) у односу на измерене вредности



Слика 7.9 Корелација (4.27) примењена на расположиве експерименталне податке

Табела 7.4.2 Параметри за корелацију (4.27)

Аутор	Референца	Корелација	SD , %	KO , %
Briggs и Young	[28]	(4.27)	28,9	86,9

Као и у случају пада притиска, с обзиром на веома узак опсег у ком важи корелација за интензитет прелаза топлоте аутора [30], као и да највећи број експерименталних података испада из неког од опсега дефинисаних у поглављу 4.6.4, није могуће применити корелацију (4.30) на расположиве експерименталне податке.

7.5 Аналогија преноса количине кретања и преноса топлоте

Како је већ напоменуто у поглављу 3.2, успостављањем неке врсте релације између коефицијента прелаза топлоте и коефицијента трења било би веома значајно, јер би се тада запажања добијена истраживањем брзинског поља могла директно искористити за предвиђање температурског поља и обратно. Везу између коефицијента прелаза топлоте и коефицијента трења први је уочио Рејнолдс 1874. године и објавио у раду [54].

У поглављу 7 је препоручена једначина за израчунавање коефицијента трења (7.72), добијена анализирањем укупно 807 различитих радних режима, док је за израчунавање коефицијента прелаза топлоте препоручена једначина (7.74), добијена анализирањем укупно 896 различитих

радних режима. У даљој анализи, у циљу успостављања аналогije између коефицијента прелаза топлоте и коефицијента трења, Рејнолдсови бројеви су ограничени у опсегу од 400 – 12000 с обзиром да је поменути опсег најинтересантнији у индустријској пракси. Нова база података садржи укупно 375 различитих радних режима за коефицијент трења и 389 различитих радних режима за коефицијент прелаза топлоте, а успостављене корелације имају следећи облик:

- корелација за израчунавање коефицијента трења

$$\xi = 41,56 \cdot \text{Re}^{-0,33} \cdot \left(\frac{S_s}{S_{mr}} \right)^{-0,81} \quad (7.75)$$

- корелација за израчунавање коефицијента прелаза топлоте

$$\text{Nu} = 0,59 \cdot \text{Re}^{0,66} \cdot \left(\frac{S_s}{S_{mr}} \right)^{-0,54} \cdot \text{Pr}^{1/3} \quad (7.76)$$

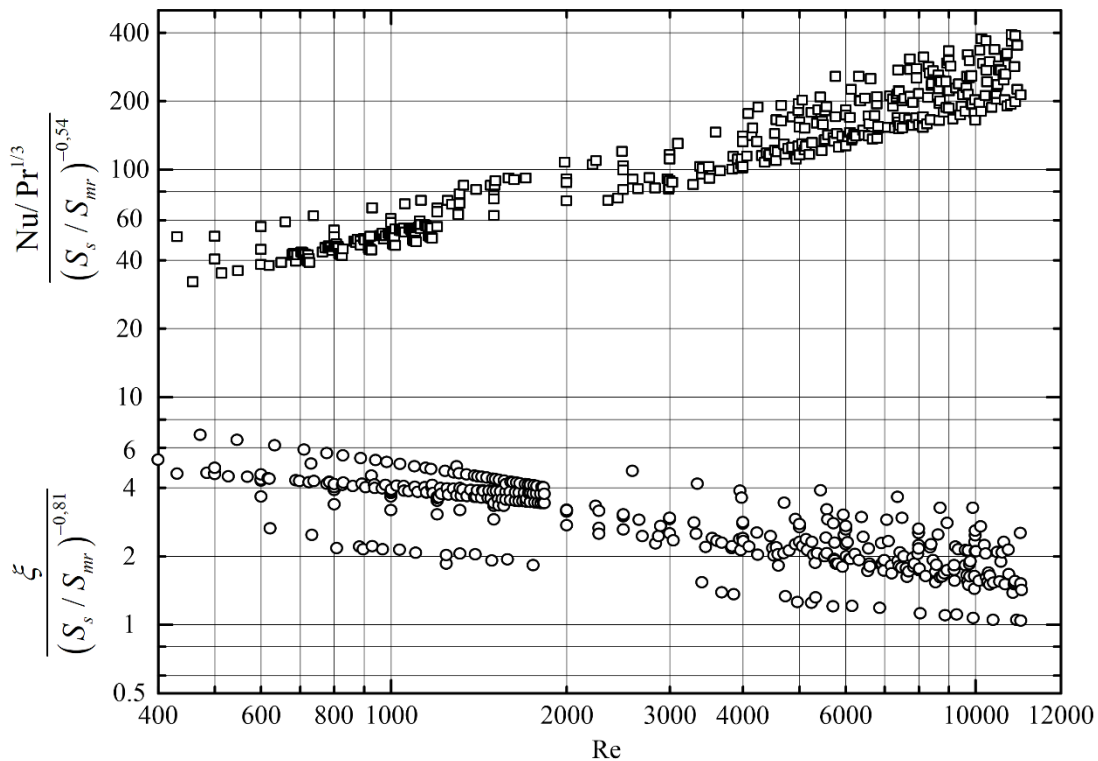
Статистички параметри корелација (7.75) и (7.76) су приказане у табели 7.5.1. На дијаграму на слици 7.10 приказане су корелације (7.75) и (7.76) примењене на све расположиве експерименталне податке за интензитет прелаза топлоте и пад притиска при попречном струјању ваздуха преко снопа завојно оребрених цеви.

Табела 7.5.1 Параметри за корелације (7.75) и (7.76)

Корелација	<i>SD</i> , %	<i>KO</i> , %
(7.75)	21,7	95
(7.76)	18,5	93,9

Дељењем једначина (7.75) и (7.76) успоставља се следећа релација

$$\frac{\text{Nu}/\text{Pr}^{1/3}}{\xi} = \frac{\text{Re} \cdot (S_s / S_{mr})^{0,27}}{70,4} \quad (7.77)$$



Слика 7.10 Корелације (7.75) и (7.76) примењене на експерименталне податке

На основу једначине (7.77) може се закључити да је увођењем брзине ваздуха сведене на порозни пресек размењивача, као и односа површина (S_s / S_{mr}) омогућено поређење експерименталних података за пад притиска и прелаз топлоте у форми која је дефинисана формулацијом аналогије између ова два физичка феномена. Такође, једначина (7.77) има релативно једноставан облик који омогућава да се на основу познатих података о коефицијенту трења добију поуздани подаци за коефицијент прелаза топлоте и обратно.

7.6 Дискусија о резултатима

Дуги низ година истраживачки рад се заснивао на мерењу и приказивању измерених експерименталних података за појединачне типове оребрења у форми дијаграма. Пре објављивања чланка [23] многи аутори су објавили корелације за пад притиска и интензитет размене топлоте при струјању флуида преко снопа глатких (неоребрених) цеви, при чему је карактеристична величина у Рејнолдсовом броју углавном био спољашњи пречник цеви. С обзиром на знатно сложенију геометрију оребрених цеви, аутори су у чланку [23] објављеном 1945. године први пут као карактеристичну величину у Рејнолдсовом броју употребили хидраулички пречник у ком фигурише однос укупне запремине међуцевног простора (запремина канала у ком је смештен цевни снап умањен за запремину цеви), и укупне оквашене површине. Након тога, многи истраживачи су користили хидраулички пречник као карактеристичну величину дефинисану на следећи начин: $d_h = 4 \cdot \frac{\varepsilon_{pov}}{s_V}$, а у циљу уопштавања корелација на широк

опсег размењивача топлоте који се користе у индустрији, покушали су да установе различите додатне геометријске односе као што су (s_t / s_l) , (δ_r / d_{kr}) итд. У оквиру истраживања везаних за ову дисертацију је уочено да једноставни односи дужина не могу да обухвате на адекватан начин геометријске параметре. Из тог разлога је примењен сложенији однос (S_s / S_{mr}) и запреминска порозност ε_{pov} , чиме су једним изразом обухваћени сви геометријски параметри оребреног снопа.

Друга два параметра од значаја која су примењена у овој дисертацији су стварни хидраулички пречник дефинисан једначином (7.3) и брзина струјања кроз порозни пресек размењивача дефинисана једначином (7.2). Применом ова два параметра је постигнуто даље побољшање решења проблема, при чему су као резултат добијене корелације које се са релативно великом сигурношћу могу користити за одређивање топлотних и струјних параметара на размењивачима топлоте са завојно оребреним цевима.

8 ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА

Дуже од два века инжењери и научници се баве истраживањем топлотних и струјних перформанси цевних размењивача топлоте у циљу смањења димензија апарата кроз повећање интензитета размене топлоте, као и у циљу истраживања могућности за смањење утроска енергије за рад апарата. Проучавање рада ових апарата се одвија на више нивоа: истраживање динамике опструјавања оребрених цеви, истраживања интензитета размене топлоте, утицај променљивих радних услова на перформансе размењивача, истраживања карактеристика споја ребара и цеви, итд.

Експериментална истраживања која служе као темељ мањег броја успостављених процедура за прорачун коефицијента прелаза топлоте и коефицијента трења при попречном опструјавању гасом снопа попречно оребрених цеви, углавном су старијег датума (1940-1990).

Новији радови углавном могу да се поделе у две групе. У првом случају резултати експеримената коришћени су за успостављање нових корелација за коефицијент прелаза топлоте и коефицијент трења (једначине у бездимензионом облику), док су у другом случају резултати експеримената коришћени за проверу, побољшање и проширење области примене прорачунских процедура препоручених у англосаксонској и руској литератури из друге половине прошлог века. Новине и разлике у приступима углавном се огледају у различитом дефинисању бездимензионих геометријских односа с циљем постизања што веће прецизности и/или проширивања области примене добијених једначина. Неретко је, ипак, поузданост добијених једначина незадовољавајућа, а примена ограничена само на одређене типове размењивача.

У доступној литератури се ретко могу пронаћи извори којима се могу дефинисати функционалне везе између карактеристичних параметара на основу којих се могу израчунати интензитет размене топлоте и отпори приликом опструјавања оребреног цевног снопа, а даљом анализом је утврђено да се прорачунате вредности коефицијента прелаза топлоте и коефицијента трења према различитим једначинама значајно разликују. Један од разлога ове појаве је и тај што су корелације које се срећу у литератури у највећем броју случајева дате без одговарајуће теоријске подлоге, тако да су приказани резултати испитивања применљиви најчешће само за инсталације на којима је испитивање вршено. Применљивост ових резултата за другачија постројења је практично врло ограничена.

Истраживања која су спроведена у циљу утврђивања поузданих једначина којима би се могао описати рад размењивача топлоте са завојно оребреним цевима су:

- математичко моделирање ради утврђивања параметара од значаја (бездимензионих бројева потребних за примену теорије сличности, као и других параметара потребних за опис рада предметних апарата);
- експериментално истраживање радних параметара на физичком моделу;
- статистичка анализа резултата истраживања и њихово уопштавање помоћу усвојених математичких модела.

Експериментални рад је спроведен на три различите конфигурације размењивача топлоте са оребреним цевима индустријских размера. Основне карактеристике експерименталног рада су дате у поглављу 5. Да би добијени резултати могли да се упореде са резултатима других истраживача бирани су попречни пресек апарата, број редова цеви и карактеристике оребрења

цеви из опсега апарата који се примењују у индустрији. Такође, протоци радних флуида су варирани у опсегу протока радних флуида који захтевају апарати индустријског типа.

У саставу анализе експериментално добијених података проверени су наводи из релевантних литературних извора и извршена је комплетна статистичка анализа сопствених и свих доступних објављених експерименталних података.

На основу ових истраживања утврђена је прорачунска процедура која се са успехом може користити за димензионисање нових размењивача топлоте, као и за контролне прорачуне постојећих размењивача са завојним ребрима. У поглављу 7 је препоручена једначина (7.72) за израчунавање отпора струјању

$$\xi = (1,59 + 101 \cdot \text{Re}^{-0,52}) \cdot \left(\frac{S_s}{S_{mr}} \right)^{-0,71} \cdot \varepsilon^{1,2} \quad (8.1)$$

са средњим квадратним одступањем $SD=20,9\%$ и корелационим односом $KO=95,1\%$, као и једначина (7.74) за прорачун коефицијента прелаза топлоте

$$\text{Nu} = 0,56 \cdot \text{Re}^{0,68} \cdot \left(\frac{S_s}{S_{mr}} \right)^{-0,48} \cdot \varepsilon^{0,82} \cdot \text{Pr}^{1/3} \quad (8.2)$$

са средњим квадратним одступањем $SD = 20,6\%$ и корелационим односом $KO = 98,2\%$.

Са друге стране све до сада објављене корелације су такође подвргнуте статистичкој анализи и установљено је да се не могу са довољном сигурношћу користити за прорачуне разматраних феномена.

Оригинални **научни допринос** проучавању проблематике везане за цевне размењиваче топлоте са завојним ребрима, изложен у овој дисертацији, представља следеће:

- представљен је преглед литературе који се односи на постојеће корелације за израчунавање отпора струјању и коефицијента прелаза топлоте при попречном струјању ваздуха преко снопа оребрених цеви и дат је критички осврт на исту – допринос је представљен у радовима [47], [48] и [53];
- извршено је експериментално истраживање које је проширило и допунило постојеће податке о понашању предметних размењивача топлоте;
- извршена је анализа сопствених експерименталних резултата и експерименталних резултата других аутора из различитих литературних извора – допринос је представљен у радовима [48] и [53];

Поред тога, у дисертацији је остварен и **инжењерски допринос** – добијене су оригиналне једначине за израчунавање отпора струјању и коефицијента прелаза топлоте при попречном струјању ваздуха и других гасова преко снопа оребрених цеви, које се могу са сигурношћу користити у инжењерској пракси – допринос је представљен у радовима [47], [48] и [53].

9 ЛИТЕРАТУРА

- [1] Б. Јаћимовић and С. Генић, Топлотне операције и апарати Део 1: Рекуперативни размењивачи топлоте, Београд: Машински факултет Унивезитета у Београду, 2016.
- [2] Т. Курпан, Heat exchanger design handbook, 2nd ed., Boca Raton, Florida: CRC Press Taylor and Francis group, 2013.
- [3] G. Towler and R. K. Sinnott, Chemical Engineering Design, Elsevier, 2008.
- [4] V. Ganapathy, "Process - design criteria", *Chemical engineering*, pp. 112 - 119, 1978.
- [5] П. Колендић, Истраживање параметара транспорта топлоте код оребрених хладњака и загрејача, Докторска дисертација, Београд, 2015.
- [6] С. Генић, Б. Јаћимовић, М. Јарић и Н. Будимир, Својства процесних флуида, Београд: Савез машинских и електротехничких инжењера и техничара Србије, 2014..
- [7] E. A. D. Saunders, "Heat exchangers: Selection design and construction", in *Air cooled heat exchanger*, MA, Addison Wesley Longman, 1989.
- [8] M. V. Bhatia and P. N. Cheremisinoff, Heat transfer equipment, Lancaster: Technomic Publishing, 1980.
- [9] J.W. Brown and G. J. Benkley, "Heat exchangers in cold service - A contractor's view", *Chemical Engineering Progress*, vol. 70, pp. 59 - 62, 1997.
- [10] С. Вујић, Расхладни уређаји, Београд: Машински факултет, 1991.
- [11] Б. Јаћимовић и С. Генић, Дифузионе операције и апарати Део 1: Основи транспорта супстанције, Београд: Машински факултет, 2007.
- [12] Б. Јаћимовић и С. Генић, Принципи моделирања у процесној техници, Београд: Скрипта за докторске студије, Машински факултет, 2005.
- [13] S. P. Mahulikar and H. Herwig, "Fluid friction in incompressible laminar convection: Reynolds' analogy revisited for variable fluid properties", *The European Physical Journal B*, vol. 62, pp. 77 - 86, 2008.
- [14] T. H. Chilton and A. P. Colburn, "Mass Transfer (Absorption) Coefficients Prediction from Data on Heat Transfer and Fluid Friction", *Industrial & Engineering Chemistry*, vol. 26, 1934.

- [15] C. E. Lapple and C. B. Shepherd, "Calculation of particle trajectories", *Ind. Eng. Chem.*, vol. 32, p. 605, 1940.
- [16] S. B. Genić, B. M. Jaćimović and B. Janjić, "Experimental Research of Highly Viscous Fluid Cooling In Cross-Flow to a Tube Bundle", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 50, pp. 1288 - 1294, 2007.
- [17] S. L. Jameson and N. Y. Schenectady, "Tube spacing in finned tube banks", *Transaction of the A.S.M.E.*, vol. 67, no. 8, pp. 633-642, 1945.
- [18] W. M. Kays and A. L. London, *Compact heat exchangers*, National press, Palo Alto, 1955.
- [19] Trane, "Extended surface heat transfer equipment", *Trane Company Bulletin DS 378*, 1953.
- [20] В. Ф. Юдин, Теплообмен поперечно - оребренных труб, Ленинград: Ленинград "Машиностроение", 1982.
- [21] P. W. Eckels and T. J. Rabas, "Heat transfer and pressure drop of typical air cooler finned tubes", *Transactions of the ASME*, vol. 107, pp. 198-204, 1985.
- [22] H. F. Jiang, C. W. Wu and Y. Ping, "Experimental investigation of heat transfer and flowing resistance for air flow cross over spiral finned tube heat exchanger", *Energy Procedia*, vol. 17, pp. 741-749, 2012.
- [23] A. Gunter and W. A. Shaw, "A general correlation of friction factors for various types of surfaces in crossflow", *Transactions of the A.S.M.E.*, pp. 643-660, 1945.
- [24] A. P. Colburn, "A method of correlating forced - convection heat transfer data and a comparison with fluid friction", *American Institute of chemical engineering*, vol. 29, pp. 174-210, 1933.
- [25] B. E. Short, "A review of heat transfer coefficients and friction factors for tubular heat exchangers", *Transaction A.S.M.E.*, vol. 64, pp. 779-785, 1942..
- [26] R. A. Bowman, "Investigations of heat transfer rates on the external surface of baffled tube banks", *Heat Transfer A.S.M.E.*, vol. 28, pp. 75-81, 1936.
- [27] E. C. Hoge, "Experimental investigation of effects of equipment size on convection heat transfer and flow resistance in crossflow of gases over tube banks", *Transaction A.S.M.E.*, vol. 59, pp. 573-581, 1937.

- [28] D. E. Briggs and E. H. Young, "Convection heat transfer and pressure drop of air flowing across triangular pitch banks of finned tubes", *Chemical Engineering Progress Symposium Series*, vol. 59, pp. 1-10., 1963.
- [29] K. K. Robinson and D. E. Briggs, "Pressure drop of air flowing across triangular pitch banks of finned tubes", *Chemical Engineering Progress Symposium Series*, vol. 62, pp. 177-182, 1964.
- [30] A. Nir, "Heat transfer and friction factor correlations for crossflow over staggered finned tube banks", *Heat transfer engineering*, vol. 12, no. 1, pp. 43-58, 1991.
- [31] EN 305: 1997 Heat exchangers - Definitions of performance of heat exchangers and the general test procedure for establishing performance of all heat exchangers, 1997.
- [32] EN 306: 1997 Heat exchangers - Methods of measuring the parameters for establishing performance, 1997.
- [33] EN 307: 1997 Heat exchangers - Guidelines for preparing installation, operating and maintenance instructions required to maintain the performance of each type of heat exchanger, 1997.
- [34] EN 1148: 1997 Heat exchangers – Water to water heat exchangers for district heating – Test procedure for establishing the performance data, 1997.
- [35] С. Генић, Б. Јаћимовић, М. Јарић and Н. Будимир, "Испитивање гарантованих перформанси размењивача топлоте ИТН 58 произвођача Кирка-Сури из Београда уграђеног у топлани Вождовац у Београду, евиденциони број И07.05-77/2008", Иновациони центар Машинског факултета, Београд, 2008.
- [36] С. Генић, Б. Јаћимовић, М. Јарић and Н. Будимир, "Испитивање гарантованих перформанси размењивача топлоте ИТН 58 произвођача Кирка-Сури из Београда уграђеног у топлани Коњарник у Београду, евиденциони број И07.05-47/2007", Иновациони центар Машинског факултета, Београд, 2008.
- [37] SRPS EN ISO 5167-2:2012, *Мерење протока флуида помоћу уређаја са диференцијалним притиском уграђених у цевоводе кружног попречног пресека - Део 2: Мерне бленде.*
- [38] F. H. Morris and W. G. Whitman, "Heat transfer For oils and water in Pipes", *Industrial and engineering chemistry*, vol. 20, pp. 234-240, 1928.
- [39] A. E. Lawrence and T. K. Sherwood, "Heat transmittion to water flowing in pipes", *Industrial and engineering chemistry*, vol. 23, no. 3, pp. 301-309, 1931.

- [40] C. G. Kirkbride and W. L. McCabe, "Heat transfer to liquids in viscous flow", *Industrial and engineering chemistry*, vol. 23, pp. 625-631, 1931.
- [41] T. K. Sherwood, D. Kiley and D. E. Mangsen, "Heat transmission to oil flowing in pipes", *Industrial and engineering chemistry*, vol. 24, no. 3, pp. 273-277, 1932.
- [42] E. N. Sieder and G. E. Tate, "Heat transfer and pressure drop of liquids in tubes", *Industrial and engineering chemistry*, vol. 28, no. 12, pp. 1429-1435, 1936.
- [43] A. K. Kupper, "Combined free and forced convection in horizontal tube under uniform heat flux", *Graduate degree thesis*, 1968.
- [44] D. Lelea, S. Nishio and K. Takano, "The experimental research on microtube heat transfer and fluid flow of distilled water", *International journal of heat and mass transfer*, vol. 36, no. 11, pp. 2710-2713, 1993.
- [45] S. Z. Heris, S. G. Etemad and M. N. Esfahany, "Experimental investigation of oxide nanofluids laminar flow convective heat transfer", *International communications in heat and mass transfer*, vol. 33, pp. 529-535, 2006.
- [46] H. Hausen, „Warmeübertragung in gegenstrom, gleichstrom und kreuzstrom“, *Springer-Verlag, Berlin*, 1976.
- [47] M. Otović, M. Mihailović, S. Genić, B. Jaćimović, U. Milovančević and S. Marković, "Reconsideration of data and correlations for plate finned-tube", *Heat and Mass Transfer*, vol. 54, no. 10, pp. 2988-2994, 2018.
- [48] S. Marković, B. Jaćimović, S. Genić, M. Mihailović, U. Milovančević and M. Otović, "Air side pressure drop in plate finned tube heat exchangers", *International Journal of Refrigeration*, vol. 99, pp. 24-29, 2019.
- [49] S. Ergun, "Fluid flow through packed columns", *Chemical Engineering Progress*, vol. 2, pp. 89-94, 1952.
- [50] М. Шашић, Транспорт флуида и чврстих материјала цевима, Београд: Научна књига, 1990.
- [51] B. Jaćimović, S. Genić and B. Latinović, "Research on the air pressure drop in plate finned tube heat exchangers", *International Journal of Refrigeration*, vol. 29, no. 7, pp. 1138 - 1143, 2006.
- [52] S. Genić, B. Jaćimović and B. Latinović, "Research on air pressure drop in helically-finned tube heat exchangers", *Applied Thermal Engineering*, vol. 26, pp. 478 - 485, 2006.

- [53] M. Mihailović, U. Milovančević, S. Genić, B. Jaćimović, M. Otović and P. Kolendić, "Air side heat transfer coefficient in plate finned tube heat exchangers", *Experimental Heat Transfer*, 2019.
- [54] O. Reynolds, "On the Extent and Action of the Heating Surface for Steam Boilers", *Manchester Lit. Phil. Soc.*, vol. 14, pp. 7-12, 1874.

10 ПРИЛОЗИ

10.1 Резултати мерења топлотних и струјних перформанси размењивача са завојно оребреним цевима

Коришћене ознаке:

- \dot{V}_1 (m³/s) – запремински проток топлијег флуида;
- \dot{V}_2 (m³/s) – запремински проток топлијег флуида;
- w_{kan} (m/s) – брзина струјања флуида сведена на попречни пресек струјног канала;
- t_{1p} (°C) – температура топлијег флуида на улазу;
- $t_{1к}$ (°C) – температура топлијег флуида на излазу;
- t_{2p} (°C) – температура хладнијег флуида на улазу;
- $t_{2к}$ (°C) – температура хладнијег флуида на излазу;
- Δp_2 (Pa) – измерени пад притиска на размењивачу топлоте,

10.1.1 Резултати мерења пада притиска

Број редова цеви	\dot{V}_2 (m ³ /s)	\dot{V}_2 (m ³ /h)	w_{kan} (m/s)	Δp_2 (Pa)
2	0,10	366	0,49	1,85
2	0,12	423	0,57	2,35
2	0,14	491	0,66	2,99
2	0,15	551	0,74	3,62
2	0,17	603	0,81	4,19
2	0,18	642	0,86	4,63
2	0,19	689	0,92	5,19
2	0,20	731	0,98	5,71
2	0,21	763	1,02	6,12
2	0,22	804	1,08	6,65
2	0,24	852	1,14	7,30
2	0,25	889	1,19	7,82
2	0,25	909	1,22	8,11
2	0,27	960	1,29	8,84
2	0,28	993	1,33	9,33
2	0,28	1016	1,36	9,67
2	0,29	1045	1,40	10,11
2	0,30	1078	1,45	10,63
2	0,30	1093	1,47	10,86
2	0,31	1110	1,49	11,14
2	0,31	1131	1,52	11,47

Број редова цеви	\dot{V}_2 (m ³ /s)	\dot{V}_2 (m ³ /h)	w_{kan} (m/s)	Δp_2 (Pa)
2	0,32	1159	1,56	11,91
2	0,33	1171	1,57	12,12
2	0,33	1188	1,60	12,40
2	0,34	1213	1,63	12,81
2	0,35	1244	1,67	13,33
2	0,35	1255	1,69	13,52
2	0,35	1272	1,71	13,81
2	0,36	1290	1,73	14,12
2	0,37	1318	1,77	14,60
2	0,37	1333	1,79	14,85
2	0,37	1344	1,80	15,05
2	0,38	1362	1,83	15,37
2	0,38	1380	1,85	15,68
2	0,39	1405	1,89	16,13
2	0,39	1415	1,90	16,31
4	0,09	334	0,45	2,09
4	0,11	409	0,55	3,04
4	0,13	481	0,65	4,10
4	0,15	534	0,72	4,98
4	0,16	574	0,77	5,69
4	0,17	610	0,82	6,38
4	0,17	608	0,82	6,35

Број редова цеви	\dot{V}_2 (m ³ /s)	\dot{V}_2 (m ³ /h)	w_{kan} (m/s)	Δp_2 (Pa)
4	0,18	643	0,86	7,04
4	0,19	692	0,93	8,07
4	0,20	727	0,98	8,84
4	0,21	760	1,02	9,60
4	0,22	794	1,07	10,43
4	0,23	816	1,10	10,97
4	0,24	853	1,14	11,90
4	0,25	887	1,19	12,80
4	0,25	912	1,22	13,49
4	0,26	944	1,27	14,36
4	0,27	968	1,30	15,04
4	0,28	993	1,33	15,78
4	0,29	1030	1,38	16,91
4	0,30	1063	1,43	17,90
4	0,30	1090	1,46	18,78
4	0,31	1113	1,49	19,51
4	0,32	1141	1,53	20,42
4	0,32	1160	1,56	21,06
4	0,33	1175	1,58	21,58
4	0,33	1194	1,60	22,24
4	0,34	1220	1,64	23,13
4	0,34	1240	1,66	23,83

Број редова цеви	\dot{V}_2 (m ³ /s)	\dot{V}_2 (m ³ /h)	w_{kan} (m/s)	Δp_2 (Pa)
4	0,35	1267	1,70	24,82
4	0,36	1285	1,73	25,48
4	0,36	1312	1,76	26,48
4	0,37	1335	1,79	27,36
4	0,37	1346	1,81	27,76
4	0,38	1359	1,82	28,27
4	0,38	1376	1,85	28,94
4	0,39	1400	1,88	29,87
4	0,39	1421	1,91	30,70
6	0,10	376	0,50	3,98
6	0,12	441	0,59	5,28
6	0,13	478	0,64	6,10
6	0,15	542	0,73	7,61
6	0,16	562	0,75	8,13
6	0,17	603	0,81	9,20
6	0,18	641	0,86	10,25
6	0,19	667	0,90	11,02
6	0,20	703	0,94	12,08
6	0,20	728	0,98	12,85
6	0,21	749	1,01	13,52
6	0,22	777	1,04	14,42
6	0,23	817	1,10	15,75

Број редова цеви	\dot{V}_2 (m ³ /s)	\dot{V}_2 (m ³ /h)	w_{kan} (m/s)	Δp_2 (Pa)
6	0,23	832	1,12	16,26
6	0,24	862	1,16	17,32
6	0,25	892	1,20	18,41
6	0,25	917	1,23	19,31
6	0,26	946	1,27	20,42
6	0,27	973	1,31	21,44
6	0,28	1005	1,35	22,72
6	0,28	1023	1,37	23,47
6	0,29	1047	1,41	24,41
6	0,30	1079	1,45	25,74
6	0,30	1086	1,46	26,07
6	0,31	1109	1,49	27,02
6	0,32	1138	1,53	28,31
6	0,32	1151	1,55	28,88
6	0,33	1185	1,59	30,38
6	0,33	1202	1,61	31,16
6	0,34	1221	1,64	32,03
6	0,35	1242	1,67	33,03
6	0,35	1266	1,70	34,16
6	0,36	1286	1,73	35,11
6	0,36	1303	1,75	35,96
6	0,37	1321	1,77	36,84

Број редова цеви	\dot{V}_2 (m ³ /s)	\dot{V}_2 (m ³ /h)	w_{kan} (m/s)	Δp_2 (Pa)
6	0,37	1342	1,80	37,88
6	0,38	1367	1,84	39,11
6	0,39	1386	1,86	40,08
6	0,39	1402	1,88	40,90
6	0,39	1414	1,90	41,51
6	0,39	1420	1,91	41,82

10.1.2 Резултати мерења топлотних перформанси

Број редова цеви	\dot{V}_1 (m ³ /h)	t_{1p} (°C)	t_{1k} (°C)	\dot{V}_2 (m ³ /h)	t_{2p} (°C)	t_{2k} (°C)
2	0,58	76,35	67,68	943,82	27,17	47,08
2	0,58	76,27	67,87	887,95	27,07	47,36
2	0,58	76,30	68,14	824,67	26,98	48,00
2	0,58	76,55	68,67	749,04	26,89	48,89
2	0,58	76,37	69,09	668,33	26,86	49,70
2	0,58	76,54	69,63	594,61	26,60	50,81
2	0,48	76,37	66,18	945,11	27,27	46,45
2	0,48	76,40	66,51	887,16	27,26	46,89
2	0,48	77,01	67,43	822,58	27,16	47,81
2	0,48	76,23	67,18	748,29	27,12	48,27
2	0,48	76,48	67,90	671,02	26,96	49,24
2	0,48	76,85	68,73	590,24	26,82	50,61
2	0,39	77,43	65,00	948,05	27,56	46,27
2	0,38	77,30	65,17	888,40	27,52	46,64
2	0,38	77,22	65,54	822,12	27,37	47,22
2	0,38	77,47	66,26	750,84	27,28	48,12
2	0,39	77,46	66,88	669,51	27,22	49,22
2	0,39	77,44	67,53	590,48	27,04	50,43
2	0,29	76,91	61,64	948,07	27,67	45,22
2	0,29	76,90	62,03	889,50	27,46	45,62
2	0,29	76,91	62,56	822,40	27,38	46,28

Број редова цеви	\dot{V}_1 (m ³ /h)	t_{1p} (°C)	t_{1k} (°C)	\dot{V}_2 (m ³ /h)	t_{2p} (°C)	t_{2k} (°C)
2	0,29	77,01	63,22	748,61	27,36	47,05
2	0,29	76,86	63,77	669,80	27,11	48,03
2	0,30	76,93	64,65	590,11	27,02	49,20
2	0,20	75,95	56,31	948,73	27,58	43,24
2	0,20	75,89	56,78	891,43	27,56	43,72
2	0,20	76,02	57,40	823,07	27,38	44,37
2	0,20	75,89	58,06	749,39	27,28	45,12
2	0,20	75,98	58,95	669,92	27,18	46,21
2	0,20	75,85	59,84	590,20	26,95	47,21
4	0,49	75,92	60,64	962,51	27,32	59,09
4	0,49	75,86	61,13	905,49	27,12	59,60
4	0,49	75,96	61,91	836,92	27,03	60,43
4	0,49	75,91	62,63	759,59	26,87	61,27
4	0,49	75,95	63,37	683,34	26,57	62,29
4	0,49	76,15	64,65	597,72	26,50	63,70
4	0,41	75,93	58,46	964,85	27,55	58,01
4	0,42	75,62	58,86	909,07	27,44	58,40
4	0,42	75,90	59,79	839,02	27,25	59,39
4	0,42	75,74	60,52	762,07	27,04	60,23
4	0,42	76,01	61,72	679,62	26,92	61,54
4	0,42	75,98	62,72	598,63	26,68	62,88
4	0,34	75,37	55,44	968,39	27,76	56,43

Број редова цеви	\dot{V}_1 (m ³ /h)	t_{1p} (°C)	t_{1k} (°C)	\dot{V}_2 (m ³ /h)	t_{2p} (°C)	t_{2k} (°C)
4	0,34	75,50	55,94	909,57	27,51	57,07
4	0,34	75,47	56,82	840,74	27,33	57,96
4	0,34	75,56	57,84	760,26	27,26	59,06
4	0,34	75,63	59,01	680,84	27,03	60,30
4	0,34	75,75	60,25	599,30	26,85	61,76
4	0,27	74,93	51,58	972,04	27,85	54,55
4	0,27	75,07	52,36	911,34	27,75	55,35
4	0,27	74,89	52,90	844,08	27,46	56,00
4	0,27	75,05	54,20	767,72	27,35	57,24
4	0,27	75,16	55,52	682,71	27,07	58,73
4	0,27	75,31	56,91	600,78	26,93	60,03
4	0,21	72,94	46,52	967,65	27,86	51,37
4	0,21	73,05	47,08	910,23	27,70	52,08
4	0,21	72,55	47,88	839,88	27,49	52,72
4	0,21	72,79	48,85	760,04	27,37	53,95
4	0,21	72,55	50,11	678,57	27,14	55,15
4	0,21	71,76	51,13	596,55	26,93	56,21
6	0,41	76,85	55,95	953,92	28,05	64,71
6	0,41	77,92	57,23	891,21	28,14	66,33
6	0,41	78,26	58,57	824,58	28,02	67,42
6	0,42	78,48	59,90	748,58	27,84	68,60
6	0,42	78,60	61,32	670,36	27,71	69,81

Број редова цеви	\dot{V}_1 (m ³ /h)	t_{1p} (°C)	t_{1k} (°C)	\dot{V}_2 (m ³ /h)	t_{2p} (°C)	t_{2k} (°C)
6	0,42	78,64	62,71	590,22	27,53	70,85
6	0,36	78,06	54,43	951,61	28,46	64,80
6	0,36	78,20	55,31	895,87	28,36	65,65
6	0,36	78,28	56,48	826,37	28,25	66,68
6	0,37	77,95	57,48	749,92	28,05	67,38
6	0,37	78,10	59,03	669,57	27,84	68,67
6	0,37	77,94	60,36	589,34	27,58	69,80
6	0,31	77,85	51,31	953,85	28,55	63,28
6	0,31	77,79	51,95	899,21	28,40	63,99
6	0,31	77,78	53,15	827,60	28,22	65,01
6	0,31	76,85	54,32	749,26	28,05	65,49
6	0,31	76,08	55,10	671,98	27,83	65,97
6	0,31	75,98	56,61	589,98	27,60	67,27
6	0,26	75,42	47,44	953,65	28,60	60,13
6	0,26	74,49	48,03	895,71	28,55	60,38
6	0,26	72,95	48,20	828,46	28,20	60,19
6	0,26	72,72	49,03	751,37	27,94	61,01
6	0,26	72,64	50,30	671,29	27,66	62,20
6	0,26	72,78	52,04	589,25	27,52	63,67
6	0,20	76,91	42,33	945,20	26,82	58,68
6	0,20	77,11	43,40	886,61	26,92	59,87
6	0,20	77,25	44,68	819,32	26,91	61,12

Број редова цеви	\dot{V}_1 (m ³ /h)	t_{1p} (°C)	t_{1k} (°C)	\dot{V}_2 (m ³ /h)	t_{2p} (°C)	t_{2k} (°C)
6	0,20	77,68	46,32	745,06	26,83	62,83
6	0,21	77,49	48,07	668,42	26,73	64,26
6	0,21	77,48	49,83	584,29	26,67	65,93

10.2 Експериментални подаци из отворене литературе – пад притиска

Коришћене ознаке:

- Re – Рејнолдсов број;
- ξ – коефицијент трења;
- s_r (mm) – корак ребра;
- δ_r (mm) – дебљина ребра;
- h_r (mm) – висина ребра;
- d_{kr} (mm) – пречник у корену ребра;
- s_l (mm) – подужни корак цеви;
- s_t (mm) – попречни корак цеви;

10.2.1 S. L. Jameson and N. Y. Schenectady, "Tube spacing in finned tube banks" *Transaction of the A.S.M.E*, vol. 67, no. 8, pp. 633-642, 1945.

Re	ξ	s_r (mm)	δ_r (mm)	h_r (mm)	d_{kr} (mm)	s_l (mm)	s_t (mm)
1151	0,88	3,63	0,25	6,05	16,89	34,29	31,29
2178	0,78	3,63	0,25	6,05	16,89	34,29	31,29
3204	0,69	3,63	0,25	6,05	16,89	34,29	31,29
4230	0,59	3,63	0,25	6,05	16,89	34,29	31,29
1313	0,79	2,92	0,25	6,05	16,89	34,29	31,29
2514	0,71	2,92	0,25	6,05	16,89	34,29	31,29
3716	0,64	2,92	0,25	6,05	16,89	34,29	31,29
4918	0,57	2,92	0,25	6,05	16,89	34,29	31,29
2271	0,62	2,92	0,25	6,05	16,89	34,29	46,93
4717	0,56	2,92	0,25	6,05	16,89	34,29	46,93
7162	0,49	2,92	0,25	6,05	16,89	34,29	46,93
9608	0,42	2,92	0,25	6,05	16,89	34,29	46,93
1297	0,69	2,81	0,31	8,75	20,27	44,45	39,55
2191	0,63	2,81	0,31	8,75	20,27	44,45	39,55
3085	0,56	2,81	0,31	8,75	20,27	44,45	39,55
3979	0,50	2,81	0,31	8,75	20,27	44,45	39,55
1574	0,58	2,81	0,31	8,75	20,27	44,45	50,34
2910	0,52	2,81	0,31	8,75	20,27	44,45	50,34
4247	0,46	2,81	0,31	8,75	20,27	44,45	50,34
5584	0,40	2,81	0,31	8,75	20,27	44,45	50,34

Re	ξ	s_r (mm)	δ_r (mm)	h_r (mm)	d_{kr} (mm)	s_l (mm)	s_t (mm)
2870	0,44	2,81	0,31	8,75	20,27	44,45	69,21
5596	0,40	2,81	0,31	8,75	20,27	44,45	69,21
8322	0,36	2,81	0,31	8,75	20,27	44,45	69,21
11048	0,31	2,81	0,31	8,75	20,27	44,45	69,21
1321	0,35	2,81	0,31	8,75	20,27	20,38	69,21
2232	0,32	2,81	0,31	8,75	20,27	20,38	69,21
3143	0,28	2,81	0,31	8,75	20,27	20,38	69,21
4053	0,25	2,81	0,31	8,75	20,27	20,38	69,21
1560	0,46	2,81	0,31	8,75	20,27	34,93	50,34
2954	0,41	2,81	0,31	8,75	20,27	34,93	50,34
4348	0,37	2,81	0,31	8,75	20,27	34,93	50,34
5742	0,32	2,81	0,31	8,75	20,27	34,93	50,34
1208	0,53	2,89	0,31	9,06	26,61	52,40	49,76
2517	0,47	2,89	0,31	9,06	26,61	52,40	49,76
3825	0,41	2,89	0,31	9,06	26,61	52,40	49,76
5134	0,35	2,89	0,31	9,06	26,61	52,40	49,76
1530	0,49	2,89	0,31	9,06	26,61	52,40	78,21
3677	0,42	2,89	0,31	9,06	26,61	52,40	78,21
5823	0,36	2,89	0,31	9,06	26,61	52,40	78,21
7970	0,30	2,89	0,31	9,06	26,61	52,40	78,21

10.2.2 Trane, "Extended surface heat transfer equipment" *Trane Company Bulletin DS 378, 1953.*

Re	ξ	s_r (mm)	δ_r (mm)	h_r (mm)	d_{kr} (mm)	s_i (mm)	s_t (mm)
10000	0,35	3,46	0,46	6,86	10,56	20,38	24,77
8000	0,36	3,46	0,46	6,86	10,56	20,38	24,77
6000	0,37	3,46	0,46	6,86	10,56	20,38	24,77
5000	0,38	3,46	0,46	6,86	10,56	20,38	24,77
4000	0,40	3,46	0,46	6,86	10,56	20,38	24,77
3000	0,41	3,46	0,46	6,86	10,56	20,38	24,77
2500	0,43	3,46	0,46	6,86	10,56	20,38	24,77
2000	0,45	3,46	0,46	6,86	10,56	20,38	24,77
1500	0,48	3,46	0,46	6,86	10,56	20,38	24,77
1200	0,50	3,46	0,46	6,86	10,56	20,38	24,77
1000	0,52	3,46	0,46	6,86	10,56	20,38	24,77
800	0,56	3,46	0,46	6,86	10,56	20,38	24,77
600	0,60	3,46	0,46	6,86	10,56	20,38	24,77
10000	0,35	2,92	0,46	6,86	10,56	20,38	24,77
8000	0,36	2,92	0,46	6,86	10,56	20,38	24,77
6000	0,37	2,92	0,46	6,86	10,56	20,38	24,77
5000	0,38	2,92	0,46	6,86	10,56	20,38	24,77
4000	0,39	2,92	0,46	6,86	10,56	20,38	24,77
3000	0,41	2,92	0,46	6,86	10,56	20,38	24,77
2500	0,43	2,92	0,46	6,86	10,56	20,38	24,77
2000	0,45	2,92	0,46	6,86	10,56	20,38	24,77

Re	ξ	s_r (mm)	δ_r (mm)	h_r (mm)	d_{kr} (mm)	s_t (mm)	s_t (mm)
1500	0,47	2,92	0,46	6,86	10,56	20,38	24,77
1200	0,50	2,92	0,46	6,86	10,56	20,38	24,77
1000	0,52	2,92	0,46	6,86	10,56	20,38	24,77
800	0,55	2,92	0,46	6,86	10,56	20,38	24,77
600	0,61	2,92	0,46	6,86	10,56	20,38	24,77
500	0,66	2,92	0,46	6,86	10,56	20,38	24,77
8000	0,45	2,92	0,48	5,60	11,64	20,38	24,77
6000	0,46	2,92	0,48	5,60	11,64	20,38	24,77
5000	0,47	2,92	0,48	5,60	11,64	20,38	24,77
4000	0,49	2,92	0,48	5,60	11,64	20,38	24,77
3000	0,52	2,92	0,48	5,60	11,64	20,38	24,77
2500	0,54	2,92	0,48	5,60	11,64	20,38	24,77
2000	0,57	2,92	0,48	5,60	11,64	20,38	24,77
1500	0,60	2,92	0,48	5,60	11,64	20,38	24,77
1200	0,64	2,92	0,48	5,60	11,64	20,38	24,77
1000	0,67	2,92	0,48	5,60	11,64	20,38	24,77
800	0,71	2,92	0,48	5,60	11,64	20,38	24,77
600	0,77	2,92	0,48	5,60	11,64	20,38	24,77
500	0,81	2,92	0,48	5,60	11,64	20,38	24,77
10000	0,29	2,22	0,41	6,86	10,46	20,38	24,77
8000	0,30	2,22	0,41	6,86	10,46	20,38	24,77
6000	0,31	2,22	0,41	6,86	10,46	20,38	24,77

Re	ξ	s_r (mm)	δ_r (mm)	h_r (mm)	d_{kr} (mm)	s_t (mm)	s_t (mm)
5000	0,31	2,22	0,41	6,86	10,46	20,38	24,77
4000	0,32	2,22	0,41	6,86	10,46	20,38	24,77
3000	0,33	2,22	0,41	6,86	10,46	20,38	24,77
2500	0,35	2,22	0,41	6,86	10,46	20,38	24,77
2000	0,36	2,22	0,41	6,86	10,46	20,38	24,77
1500	0,39	2,22	0,41	6,86	10,46	20,38	24,77
1200	0,41	2,22	0,41	6,86	10,46	20,38	24,77
1000	0,44	2,22	0,41	6,86	10,46	20,38	24,77
800	0,47	2,22	0,41	6,86	10,46	20,38	24,77
600	0,52	2,22	0,41	6,86	10,46	20,38	24,77
500	0,56	2,22	0,41	6,86	10,46	20,38	24,77
400	0,60	2,22	0,41	6,86	10,46	20,38	24,77

10.2.3 В. Ф. Юдин, Теплообмен поперечно - оребренных труб, Ленинград: Ленинград "Машиностроение", 1982.

Re	ξ	s_r (mm)	δ_r (mm)	h_r (mm)	d_{kr} (mm)	s_l (mm)	s_t (mm)
3406	0,34	6	1,3	9	32	38,4	64
3680	0,31	6	1,3	9	32	38,4	64
3862	0,30	6	1,3	9	32	38,4	64
4734	0,30	6	1,3	9	32	38,4	64
4957	0,28	6	1,3	9	32	38,4	64
5245	0,28	6	1,3	9	32	38,4	64
5326	0,29	6	1,3	9	32	38,4	64
5707	0,27	6	1,3	9	32	38,4	64
6155	0,27	6	1,3	9	32	38,4	64
6865	0,26	6	1,3	9	32	38,4	64
8048	0,25	6	1,3	9	32	38,4	64
8877	0,24	6	1,3	9	32	38,4	64
9291	0,25	6	1,3	9	32	38,4	64
9914	0,24	6	1,3	9	32	38,4	64
10711	0,23	6	1,3	9	32	38,4	64
11759	0,23	6	1,3	9	32	38,4	64
11954	0,23	6	1,3	9	32	38,4	64
13019	0,23	6	1,3	9	32	38,4	64
4601	0,40	6	1,3	9	32	48	64
5320	0,42	6	1,3	9	32	48	64

Re	ξ	s_r (mm)	δ_r (mm)	h_r (mm)	d_{kr} (mm)	s_l (mm)	s_t (mm)
5823	0,41	6	1,3	9	32	48	64
6542	0,38	6	1,3	9	32	48	64
7189	0,37	6	1,3	9	32	48	64
7693	0,38	6	1,3	9	32	48	64
8771	0,36	6	1,3	9	32	48	64
9706	0,34	6	1,3	9	32	48	64
10497	0,34	6	1,3	9	32	48	64
11647	0,34	6	1,3	9	32	48	64
13085	0,32	6	1,3	9	32	48	64
14595	0,31	6	1,3	9	32	48	64
15673	0,31	6	1,3	9	32	48	64
16752	0,30	6	1,3	9	32	48	64
5547	0,54	6	1,3	9	32	64	64
6423	0,54	6	1,3	9	32	64	64
7104	0,52	6	1,3	9	32	64	64
8369	0,49	6	1,3	9	32	64	64
9245	0,49	6	1,3	9	32	64	64
9342	0,48	6	1,3	9	32	64	64
10023	0,47	6	1,3	9	32	64	64
10412	0,46	6	1,3	9	32	64	64
10899	0,46	6	1,3	9	32	64	64
12359	0,45	6	1,3	9	32	64	64

Re	ξ	s_r (mm)	δ_r (mm)	h_r (mm)	d_{kr} (mm)	s_l (mm)	s_t (mm)
12942	0,44	6	1,3	9	32	64	64
13721	0,43	6	1,3	9	32	64	64
14499	0,42	6	1,3	9	32	64	64
15375	0,41	6	1,3	9	32	64	64
16640	0,41	6	1,3	9	32	64	64
18197	0,40	6	1,3	9	32	64	64
20727	0,38	6	1,3	9	32	64	64
21603	0,38	6	1,3	9	32	64	64
23939	0,35	6	1,3	9	32	64	64
24425	0,37	6	1,3	9	32	64	64
6871	0,85	6	1,3	9	32	96	64
8875	0,95	6	1,3	9	32	96	64
11165	0,89	6	1,3	9	32	96	64
12596	0,84	6	1,3	9	32	96	64
13741	0,83	6	1,3	9	32	96	64
15888	0,80	6	1,3	9	32	96	64
19181	0,76	6	1,3	9	32	96	64
23475	0,73	6	1,3	9	32	96	64
20898	0,75	6	1,3	9	32	96	64
25015	0,74	6	1,3	9	32	96	64
27858	0,72	6	1,3	9	32	96	64
31269	0,72	6	1,3	9	32	96	64

Re	ξ	s_r (mm)	δ_r (mm)	h_r (mm)	d_{kr} (mm)	s_l (mm)	s_t (mm)
4244	0,45	6	1,3	9	32	38,4	80
6012	0,44	6	1,3	9	32	38,4	80
6984	0,43	6	1,3	9	32	38,4	80
7868	0,41	6	1,3	9	32	38,4	80
8575	0,41	6	1,3	9	32	38,4	80
9194	0,41	6	1,3	9	32	38,4	80
10520	0,38	6	1,3	9	32	38,4	80
11405	0,37	6	1,3	9	32	38,4	80
13084	0,35	6	1,3	9	32	38,4	80
14410	0,34	6	1,3	9	32	38,4	80
15736	0,33	6	1,3	9	32	38,4	80
17328	0,32	6	1,3	9	32	38,4	80
18035	0,32	6	1,3	9	32	38,4	80
6900	0,51	6	1,3	9	32	64	80
8400	0,50	6	1,3	9	32	64	80
10350	0,50	6	1,3	9	32	64	80
13349	0,46	6	1,3	9	32	64	80
14549	0,45	6	1,3	9	32	64	80
16049	0,45	6	1,3	9	32	64	80
17549	0,43	6	1,3	9	32	64	80
19049	0,43	6	1,3	9	32	64	80
20699	0,41	6	1,3	9	32	64	80

Re	ξ	s_r (mm)	δ_r (mm)	h_r (mm)	d_{kr} (mm)	s_l (mm)	s_t (mm)
22949	0,41	6	1,3	9	32	64	80
25049	0,39	6	1,3	9	32	64	80
28199	0,39	6	1,3	9	32	64	80
31049	0,38	6	1,3	9	32	64	80
34348	0,37	6	1,3	9	32	64	80
37648	0,36	6	1,3	9	32	64	80
12501	0,65	6	1,3	9	32	96	80
14510	0,62	6	1,3	9	32	96	80
16072	0,64	6	1,3	9	32	96	80
19198	0,60	6	1,3	9	32	96	80
21653	0,59	6	1,3	9	32	96	80
23885	0,57	6	1,3	9	32	96	80
26341	0,56	6	1,3	9	32	96	80
30582	0,54	6	1,3	9	32	96	80
34600	0,53	6	1,3	9	32	96	80
37056	0,53	6	1,3	9	32	96	80
41967	0,51	6	1,3	9	32	96	80
45762	0,50	6	1,3	9	32	96	80
50896	0,49	6	1,3	9	32	96	80
54691	0,49	6	1,3	9	32	96	80
5716	0,62	6	1,3	9	32	38,4	96
8635	0,55	6	1,3	9	32	38,4	96

Re	ξ	s_r (mm)	δ_r (mm)	h_r (mm)	d_{kr} (mm)	s_l (mm)	s_t (mm)
9972	0,51	6	1,3	9	32	38,4	96
11189	0,51	6	1,3	9	32	38,4	96
12040	0,50	6	1,3	9	32	38,4	96
13864	0,48	6	1,3	9	32	38,4	96
14837	0,48	6	1,3	9	32	38,4	96
17391	0,44	6	1,3	9	32	38,4	96
19580	0,43	6	1,3	9	32	38,4	96
21283	0,42	6	1,3	9	32	38,4	96
24688	0,41	6	1,3	9	32	38,4	96
12322	0,56	6	1,3	9	32	64	96
17170	0,50	6	1,3	9	32	64	96
20200	0,48	6	1,3	9	32	64	96
24239	0,47	6	1,3	9	32	64	96
27471	0,45	6	1,3	9	32	64	96
29693	0,44	6	1,3	9	32	64	96
35551	0,42	6	1,3	9	32	64	96
38379	0,42	6	1,3	9	32	64	96
40803	0,41	6	1,3	9	32	64	96
44035	0,40	6	1,3	9	32	64	96
47469	0,40	6	1,3	9	32	64	96
15198	0,65	6	1,3	9	32	96	96
17059	0,61	6	1,3	9	32	96	96

Re	ξ	s_r (mm)	δ_r (mm)	h_r (mm)	d_{kr} (mm)	s_l (mm)	s_t (mm)
18919	0,64	6	1,3	9	32	96	96
21091	0,61	6	1,3	9	32	96	96
23262	0,58	6	1,3	9	32	96	96
26053	0,58	6	1,3	9	32	96	96
27914	0,59	6	1,3	9	32	96	96
30705	0,57	6	1,3	9	32	96	96
33497	0,54	6	1,3	9	32	96	96
39080	0,54	6	1,3	9	32	96	96
45283	0,52	6	1,3	9	32	96	96
56758	0,50	6	1,3	9	32	96	96
66683	0,48	6	1,3	9	32	96	96
75988	0,47	6	1,3	9	32	96	96
19206	0,73	6	1,3	9	32	112	96
21380	0,71	6	1,3	9	32	112	96
26091	0,67	6	1,3	9	32	112	96
28990	0,64	6	1,3	9	32	112	96
30802	0,63	6	1,3	9	32	112	96
34064	0,62	6	1,3	9	32	112	96
35471	0,62	6	1,3	9	32	112	96
40538	0,59	6	1,3	9	32	112	96
42710	0,60	6	1,3	9	32	112	96
49225	0,57	6	1,3	9	32	112	96

Re	ξ	s_r (mm)	δ_r (mm)	h_r (mm)	d_{kr} (mm)	s_l (mm)	s_t (mm)
52482	0,55	6	1,3	9	32	112	96
57912	0,53	6	1,3	9	32	112	96
63988	0,53	6	1,3	9	32	112	96
68688	0,52	6	1,3	9	32	112	96
75918	0,51	6	1,3	9	32	112	96
80618	0,51	6	1,3	9	32	112	96
89294	0,50	6	1,3	9	32	112	96
8544	0,34	6	1,3	9	32	38,4	132,8
9968	0,32	6	1,3	9	32	38,4	132,8
11595	0,31	6	1,3	9	32	38,4	132,8
13222	0,31	6	1,3	9	32	38,4	132,8
15256	0,30	6	1,3	9	32	38,4	132,8
17698	0,30	6	1,3	9	32	38,4	132,8
21359	0,30	6	1,3	9	32	38,4	132,8
23393	0,29	6	1,3	9	32	38,4	132,8
25631	0,29	6	1,3	9	32	38,4	132,8
29699	0,30	6	1,3	9	32	38,4	132,8
32954	0,29	6	1,3	9	32	38,4	132,8
37429	0,29	6	1,3	9	32	38,4	132,8
41701	0,29	6	1,3	9	32	38,4	132,8
45769	0,28	6	1,3	9	32	38,4	132,8
49634	0,28	6	1,3	9	32	38,4	132,8

Re	ξ	s_r (mm)	δ_r (mm)	h_r (mm)	d_{kr} (mm)	s_l (mm)	s_t (mm)
53703	0,28	6	1,3	9	32	38,4	132,8
15409	0,47	6	1,3	9	32	64	132,8
17464	0,49	6	1,3	9	32	64	132,8
25339	0,44	6	1,3	9	32	64	132,8
30476	0,42	6	1,3	9	32	64	132,8
32873	0,42	6	1,3	9	32	64	132,8
35270	0,42	6	1,3	9	32	64	132,8
39721	0,40	6	1,3	9	32	64	132,8
42803	0,40	6	1,3	9	32	64	132,8
49651	0,40	6	1,3	9	32	64	132,8
55815	0,38	6	1,3	9	32	64	132,8
60266	0,38	6	1,3	9	32	64	132,8
69512	0,37	6	1,3	9	32	64	132,8
76018	0,37	6	1,3	9	32	64	132,8
82524	0,36	6	1,3	9	32	64	132,8
92112	0,36	6	1,3	9	32	64	132,8
22946	0,46	6	1,3	9	32	96	132,8
25939	0,47	6	1,3	9	32	96	132,8
32424	0,47	6	1,3	9	32	96	132,8
41402	0,47	6	1,3	9	32	96	132,8
47388	0,46	6	1,3	9	32	96	132,8
58861	0,43	6	1,3	9	32	96	132,8

Re	ξ	s_r (mm)	δ_r (mm)	h_r (mm)	d_{kr} (mm)	s_l (mm)	s_t (mm)
74325	0,42	6	1,3	9	32	96	132,8
83304	0,42	6	1,3	9	32	96	132,8
104753	0,39	6	1,3	9	32	96	132,8
115228	0,38	6	1,3	9	32	96	132,8
123209	0,38	6	1,3	9	32	96	132,8
140169	0,37	6	1,3	9	32	96	132,8
5432	0,33	2	1,3	5	23	34,5	64,4
7363	0,31	2	1,3	5	23	34,5	64,4
8700	0,27	2	1,3	5	23	34,5	64,4
9900	0,27	2	1,3	5	23	34,5	64,4
12108	0,25	2	1,3	5	23	34,5	64,4
13223	0,25	2	1,3	5	23	34,5	64,4
14686	0,25	2	1,3	5	23	34,5	64,4
16506	0,24	2	1,3	5	23	34,5	64,4
20259	0,23	2	1,3	5	23	34,5	64,4
22596	0,22	2	1,3	5	23	34,5	64,4
26376	0,21	2	1,3	5	23	34,5	64,4
26868	0,21	2	1,3	5	23	34,5	64,4
30179	0,20	2	1,3	5	23	34,5	64,4
33471	0,20	2	1,3	5	23	34,5	64,4
38353	0,20	2	1,3	5	23	34,5	64,4
44179	0,20	2	1,3	5	23	34,5	64,4

Re	ξ	s_r (mm)	δ_r (mm)	h_r (mm)	d_{kr} (mm)	s_l (mm)	s_t (mm)
46942	0,19	2	1,3	5	23	34,5	64,4
51836	0,19	2	1,3	5	23	34,5	64,4
59347	0,19	2	1,3	5	23	34,5	64,4
67658	0,19	2	1,3	5	23	34,5	64,4
78990	0,19	2	1,3	5	23	34,5	64,4
91663	0,19	2	1,3	5	23	34,5	64,4
94155	0,18	2	1,3	5	23	34,5	64,4
106059	0,19	2	1,3	5	23	34,5	64,4
109741	0,18	2	1,3	5	23	34,5	64,4
117486	0,18	2	1,3	5	23	34,5	64,4
130980	0,17	2	1,3	5	23	34,5	64,4
134061	0,18	2	1,3	5	23	34,5	64,4
145408	0,18	2	1,3	5	23	34,5	64,4
168965	0,18	2	1,3	5	23	34,5	64,4
181845	0,19	2	1,3	5	23	34,5	64,4
207930	0,19	2	1,3	5	23	34,5	64,4
223596	0,18	2	1,3	5	23	34,5	64,4
2591	0,21	2	1,3	10	23	36,8	69
3343	0,19	2	1,3	10	23	36,8	69
3955	0,17	2	1,3	10	23	36,8	69
4708	0,15	2	1,3	10	23	36,8	69
5571	0,14	2	1,3	10	23	36,8	69

Re	ξ	s_r (mm)	δ_r (mm)	h_r (mm)	d_{kr} (mm)	s_l (mm)	s_t (mm)
5947	0,14	2	1,3	10	23	36,8	69
6390	0,13	2	1,3	10	23	36,8	69
7052	0,13	2	1,3	10	23	36,8	69
7490	0,13	2	1,3	10	23	36,8	69
8950	0,13	2	1,3	10	23	36,8	69
10213	0,12	2	1,3	10	23	36,8	69
11940	0,11	2	1,3	10	23	36,8	69
13606	0,11	2	1,3	10	23	36,8	69
15860	0,10	2	1,3	10	23	36,8	69
16342	0,10	2	1,3	10	23	36,8	69
18938	0,10	2	1,3	10	23	36,8	69
21238	0,09	2	1,3	10	23	36,8	69
24727	0,09	2	1,3	10	23	36,8	69
26547	0,09	2	1,3	10	23	36,8	69
28390	0,09	2	1,3	10	23	36,8	69
30960	0,09	2	1,3	10	23	36,8	69
32342	0,09	2	1,3	10	23	36,8	69
36059	0,09	2	1,3	10	23	36,8	69
37887	0,09	2	1,3	10	23	36,8	69
42194	0,09	2	1,3	10	23	36,8	69
48295	0,09	2	1,3	10	23	36,8	69
54214	0,09	2	1,3	10	23	36,8	69

Re	ξ	s_r (mm)	δ_r (mm)	h_r (mm)	d_{kr} (mm)	s_l (mm)	s_t (mm)
57560	0,09	2	1,3	10	23	36,8	69
59504	0,09	2	1,3	10	23	36,8	69
63335	0,09	2	1,3	10	23	36,8	69
70511	0,09	2	1,3	10	23	36,8	69
79103	0,09	2	1,3	10	23	36,8	69
84357	0,09	2	1,3	10	23	36,8	69
622	0,12	2	1,3	10	23	37,95	46
734	0,11	2	1,3	10	23	37,95	46
808	0,10	2	1,3	10	23	37,95	46
884	0,10	2	1,3	10	23	37,95	46
897	0,10	2	1,3	10	23	37,95	46
931	0,10	2	1,3	10	23	37,95	46
968	0,10	2	1,3	10	23	37,95	46
1036	0,10	2	1,3	10	23	37,95	46
1103	0,09	2	1,3	10	23	37,95	46
1246	0,08	2	1,3	10	23	37,95	46
1246	0,09	2	1,3	10	23	37,95	46
1313	0,09	2	1,3	10	23	37,95	46
1395	0,09	2	1,3	10	23	37,95	46
1488	0,09	2	1,3	10	23	37,95	46
1583	0,09	2	1,3	10	23	37,95	46
1752	0,08	2	1,3	10	23	37,95	46

Re	ξ	s_r (mm)	δ_r (mm)	h_r (mm)	d_{kr} (mm)	s_l (mm)	s_t (mm)
6515	0,42	2,5	1,3	5	23	34,5	64,9
8278	0,35	2,5	1,3	5	23	34,5	64,9
10577	0,35	2,5	1,3	5	23	34,5	64,9
12570	0,34	2,5	1,3	5	23	34,5	64,9
14870	0,32	2,5	1,3	5	23	34,5	64,9
16786	0,31	2,5	1,3	5	23	34,5	64,9
18668	0,31	2,5	1,3	5	23	34,5	64,9
21312	0,30	2,5	1,3	5	23	34,5	64,9
25719	0,26	2,5	1,3	5	23	34,5	64,9
28668	0,27	2,5	1,3	5	23	34,5	64,9
31877	0,27	2,5	1,3	5	23	34,5	64,9
33229	0,27	2,5	1,3	5	23	34,5	64,9
38302	0,25	2,5	1,3	5	23	34,5	64,9
39701	0,25	2,5	1,3	5	23	34,5	64,9
43360	0,25	2,5	1,3	5	23	34,5	64,9
48435	0,24	2,5	1,3	5	23	34,5	64,9
56498	0,24	2,5	1,3	5	23	34,5	64,9
65157	0,24	2,5	1,3	5	23	34,5	64,9
72594	0,24	2,5	1,3	5	23	34,5	64,9
78208	0,24	2,5	1,3	5	23	34,5	64,9
85169	0,24	2,5	1,3	5	23	34,5	64,9
88945	0,23	2,5	1,3	5	23	34,5	64,9

Re	ξ	s_r (mm)	δ_r (mm)	h_r (mm)	d_{kr} (mm)	s_l (mm)	s_t (mm)
99425	0,24	2,5	1,3	5	23	34,5	64,9
112236	0,24	2,5	1,3	5	23	34,5	64,9
126467	0,23	2,5	1,3	5	23	34,5	64,9
135660	0,24	2,5	1,3	5	23	34,5	64,9
151152	0,23	2,5	1,3	5	23	34,5	64,9
170543	0,23	2,5	1,3	5	23	34,5	64,9
179561	0,23	2,5	1,3	5	23	34,5	64,9
197141	0,23	2,5	1,3	5	23	34,5	64,9
219458	0,22	2,5	1,3	5	23	34,5	64,9
291951	0,22	2,5	1,3	5	23	34,5	64,9
3300	0,19	2,5	1,3	10	23	36,8	69
4463	0,17	2,5	1,3	10	23	36,8	69
5251	0,16	2,5	1,3	10	23	36,8	69
6038	0,16	2,5	1,3	10	23	36,8	69
6563	0,15	2,5	1,3	10	23	36,8	69
7426	0,14	2,5	1,3	10	23	36,8	69
7813	0,14	2,5	1,3	10	23	36,8	69
8463	0,13	2,5	1,3	10	23	36,8	69
9805	0,13	2,5	1,3	10	23	36,8	69
11048	0,13	2,5	1,3	10	23	36,8	69
12390	0,12	2,5	1,3	10	23	36,8	69
13876	0,12	2,5	1,3	10	23	36,8	69

Re	ξ	s_r (mm)	δ_r (mm)	h_r (mm)	d_{kr} (mm)	s_l (mm)	s_t (mm)
15693	0,12	2,5	1,3	10	23	36,8	69
16710	0,12	2,5	1,3	10	23	36,8	69
18833	0,11	2,5	1,3	10	23	36,8	69
20569	0,11	2,5	1,3	10	23	36,8	69
21825	0,11	2,5	1,3	10	23	36,8	69
25443	0,11	2,5	1,3	10	23	36,8	69
30258	0,10	2,5	1,3	10	23	36,8	69
34893	0,11	2,5	1,3	10	23	36,8	69
36219	0,10	2,5	1,3	10	23	36,8	69
41599	0,10	2,5	1,3	10	23	36,8	69
45126	0,11	2,5	1,3	10	23	36,8	69
55633	0,10	2,5	1,3	10	23	36,8	69
57197	0,11	2,5	1,3	10	23	36,8	69
62318	0,11	2,5	1,3	10	23	36,8	69
64936	0,10	2,5	1,3	10	23	36,8	69
69784	0,10	2,5	1,3	10	23	36,8	69
71912	0,10	2,5	1,3	10	23	36,8	69
82048	0,10	2,5	1,3	10	23	36,8	69
84004	0,10	2,5	1,3	10	23	36,8	69
91985	0,10	2,5	1,3	10	23	36,8	69
100520	0,10	2,5	1,3	10	23	36,8	69
106534	0,10	2,5	1,3	10	23	36,8	69

Re	ξ	s_r (mm)	δ_r (mm)	h_r (mm)	d_{kr} (mm)	s_l (mm)	s_t (mm)
118505	0,10	2,5	1,3	10	23	36,8	69
133930	0,10	2,5	1,3	10	23	36,8	69
1821	0,16	2,5	1,3	15	23	41,4	72
2242	0,15	2,5	1,3	15	23	41,4	72
2657	0,13	2,5	1,3	15	23	41,4	72
2895	0,12	2,5	1,3	15	23	41,4	72
3329	0,11	2,5	1,3	15	23	41,4	72
3609	0,11	2,5	1,3	15	23	41,4	72
4009	0,11	2,5	1,3	15	23	41,4	72
4564	0,10	2,5	1,3	15	23	41,4	72
5158	0,10	2,5	1,3	15	23	41,4	72
5567	0,09	2,5	1,3	15	23	41,4	72
6225	0,09	2,5	1,3	15	23	41,4	72
7365	0,09	2,5	1,3	15	23	41,4	72
8018	0,08	2,5	1,3	15	23	41,4	72
9190	0,08	2,5	1,3	15	23	41,4	72
10444	0,07	2,5	1,3	15	23	41,4	72
11690	0,07	2,5	1,3	15	23	41,4	72
12642	0,07	2,5	1,3	15	23	41,4	72
13882	0,07	2,5	1,3	15	23	41,4	72
14650	0,07	2,5	1,3	15	23	41,4	72
17061	0,07	2,5	1,3	15	23	41,4	72

Re	ξ	s_r (mm)	δ_r (mm)	h_r (mm)	d_{kr} (mm)	s_l (mm)	s_t (mm)
19524	0,07	2,5	1,3	15	23	41,4	72
21865	0,07	2,5	1,3	15	23	41,4	72
23881	0,06	2,5	1,3	15	23	41,4	72
26157	0,06	2,5	1,3	15	23	41,4	72
28912	0,06	2,5	1,3	15	23	41,4	72
35961	0,06	2,5	1,3	15	23	41,4	72
42315	0,06	2,5	1,3	15	23	41,4	72
48219	0,06	2,5	1,3	15	23	41,4	72
51551	0,06	2,5	1,3	15	23	41,4	72
61053	0,06	2,5	1,3	15	23	41,4	72
65631	0,06	2,5	1,3	15	23	41,4	72
72625	0,06	2,5	1,3	15	23	41,4	72
81017	0,06	2,5	1,3	15	23	41,4	72
95751	0,06	2,5	1,3	15	23	41,4	72
10476	0,46	3	1,3	5	23	34,5	64,9
13508	0,41	3	1,3	5	23	34,5	64,9
16077	0,37	3	1,3	5	23	34,5	64,9
18786	0,35	3	1,3	5	23	34,5	64,9
20752	0,35	3	1,3	5	23	34,5	64,9
23125	0,33	3	1,3	5	23	34,5	64,9
24119	0,35	3	1,3	5	23	34,5	64,9
27056	0,32	3	1,3	5	23	34,5	64,9

Re	ξ	s_r (mm)	δ_r (mm)	h_r (mm)	d_{kr} (mm)	s_l (mm)	s_t (mm)
31137	0,30	3	1,3	5	23	34,5	64,9
34051	0,28	3	1,3	5	23	34,5	64,9
38514	0,29	3	1,3	5	23	34,5	64,9
42412	0,28	3	1,3	5	23	34,5	64,9
48134	0,27	3	1,3	5	23	34,5	64,9
50809	0,27	3	1,3	5	23	34,5	64,9
55726	0,27	3	1,3	5	23	34,5	64,9
64526	0,28	3	1,3	5	23	34,5	64,9
75389	0,27	3	1,3	5	23	34,5	64,9
81242	0,27	3	1,3	5	23	34,5	64,9
89045	0,26	3	1,3	5	23	34,5	64,9
97710	0,26	3	1,3	5	23	34,5	64,9
106934	0,27	3	1,3	5	23	34,5	64,9
121582	0,27	3	1,3	5	23	34,5	64,9
142734	0,27	3	1,3	5	23	34,5	64,9
151100	0,26	3	1,3	5	23	34,5	64,9
167047	0,26	3	1,3	5	23	34,5	64,9
189856	0,26	3	1,3	5	23	34,5	64,9
219254	0,26	3	1,3	5	23	34,5	64,9
251620	0,26	3	1,3	5	23	34,5	64,9
276778	0,26	3	1,3	5	23	34,5	64,9
291127	0,26	3	1,3	5	23	34,5	64,9

Re	ξ	s_r (mm)	δ_r (mm)	h_r (mm)	d_{kr} (mm)	s_l (mm)	s_t (mm)
314792	0,25	3	1,3	5	23	34,5	64,9
329981	0,26	3	1,3	5	23	34,5	64,9
352762	0,25	3	1,3	5	23	34,5	64,9
2268	0,24	3	1,3	10	23	27,6	69
2871	0,22	3	1,3	10	23	27,6	69
3679	0,21	3	1,3	10	23	27,6	69
4099	0,20	3	1,3	10	23	27,6	69
4806	0,19	3	1,3	10	23	27,6	69
5061	0,20	3	1,3	10	23	27,6	69
5362	0,19	3	1,3	10	23	27,6	69
6095	0,17	3	1,3	10	23	27,6	69
6970	0,17	3	1,3	10	23	27,6	69
7542	0,18	3	1,3	10	23	27,6	69
9772	0,17	3	1,3	10	23	27,6	69
12327	0,16	3	1,3	10	23	27,6	69
14552	0,15	3	1,3	10	23	27,6	69
15281	0,15	3	1,3	10	23	27,6	69
17791	0,14	3	1,3	10	23	27,6	69
19909	0,15	3	1,3	10	23	27,6	69
24615	0,15	3	1,3	10	23	27,6	69
29234	0,14	3	1,3	10	23	27,6	69
30383	0,14	3	1,3	10	23	27,6	69

Re	ξ	s_r (mm)	δ_r (mm)	h_r (mm)	d_{kr} (mm)	s_l (mm)	s_t (mm)
35626	0,14	3	1,3	10	23	27,6	69
39506	0,14	3	1,3	10	23	27,6	69
48334	0,14	3	1,3	10	23	27,6	69
59374	0,13	3	1,3	10	23	27,6	69
63646	0,13	3	1,3	10	23	27,6	69
68930	0,13	3	1,3	10	23	27,6	69
71126	0,13	3	1,3	10	23	27,6	69
80309	0,13	3	1,3	10	23	27,6	69
82309	0,13	3	1,3	10	23	27,6	69
88647	0,13	3	1,3	10	23	27,6	69
103625	0,13	3	1,3	10	23	27,6	69
117005	0,13	3	1,3	10	23	27,6	69
2692	0,15	3	1,3	15	23	41,4	72
3547	0,14	3	1,3	15	23	41,4	72
3951	0,14	3	1,3	15	23	41,4	72
4701	0,12	3	1,3	15	23	41,4	72
5288	0,12	3	1,3	15	23	41,4	72
6321	0,11	3	1,3	15	23	41,4	72
6922	0,11	3	1,3	15	23	41,4	72
7176	0,11	3	1,3	15	23	41,4	72
7844	0,11	3	1,3	15	23	41,4	72
8939	0,10	3	1,3	15	23	41,4	72

Re	ξ	s_r (mm)	δ_r (mm)	h_r (mm)	d_{kr} (mm)	s_l (mm)	s_t (mm)
10575	0,10	3	1,3	15	23	41,4	72
12399	0,09	3	1,3	15	23	41,4	72
14177	0,09	3	1,3	15	23	41,4	72
16089	0,09	3	1,3	15	23	41,4	72
17699	0,08	3	1,3	15	23	41,4	72
19208	0,08	3	1,3	15	23	41,4	72
19648	0,08	3	1,3	15	23	41,4	72
22267	0,08	3	1,3	15	23	41,4	72
26040	0,08	3	1,3	15	23	41,4	72
29658	0,08	3	1,3	15	23	41,4	72
33937	0,08	3	1,3	15	23	41,4	72
36418	0,08	3	1,3	15	23	41,4	72
37755	0,08	3	1,3	15	23	41,4	72
42444	0,08	3	1,3	15	23	41,4	72
44221	0,08	3	1,3	15	23	41,4	72
46882	0,08	3	1,3	15	23	41,4	72
51927	0,08	3	1,3	15	23	41,4	72
59497	0,08	3	1,3	15	23	41,4	72
65180	0,08	3	1,3	15	23	41,4	72
82792	0,08	3	1,3	15	23	41,4	72
91682	0,07	3	1,3	15	23	41,4	72
97083	0,08	3	1,3	15	23	41,4	72

Re	ξ	s_r (mm)	δ_r (mm)	h_r (mm)	d_{kr} (mm)	s_l (mm)	s_t (mm)
111076	0,07	3	1,3	15	23	41,4	72
119317	0,08	3	1,3	15	23	41,4	72
11117	0,96	5	1,3	2	23	27,6	69
13373	0,92	5	1,3	2	23	27,6	69
16880	0,90	5	1,3	2	23	27,6	69
20388	0,86	5	1,3	2	23	27,6	69
23744	0,83	5	1,3	2	23	27,6	69
26382	0,82	5	1,3	2	23	27,6	69
28801	0,81	5	1,3	2	23	27,6	69
32318	0,77	5	1,3	2	23	27,6	69
35176	0,76	5	1,3	2	23	27,6	69
38803	0,73	5	1,3	2	23	27,6	69
42505	0,73	5	1,3	2	23	27,6	69
43036	0,74	5	1,3	2	23	27,6	69
46165	0,72	5	1,3	2	23	27,6	69
56535	0,63	5	1,3	2	23	27,6	69
71704	0,64	5	1,3	2	23	27,6	69
83943	0,63	5	1,3	2	23	27,6	69
90784	0,60	5	1,3	2	23	27,6	69
106107	0,57	5	1,3	2	23	27,6	69
114392	0,60	5	1,3	2	23	27,6	69
149302	0,57	5	1,3	2	23	27,6	69

Re	ξ	s_r (mm)	δ_r (mm)	h_r (mm)	d_{kr} (mm)	s_l (mm)	s_t (mm)
155532	0,58	5	1,3	2	23	27,6	69
186079	0,57	5	1,3	2	23	27,6	69
213145	0,55	5	1,3	2	23	27,6	69
215467	0,55	5	1,3	2	23	27,6	69
256614	0,57	5	1,3	2	23	27,6	69
265317	0,53	5	1,3	2	23	27,6	69
275905	0,57	5	1,3	2	23	27,6	69
317647	0,56	5	1,3	2	23	27,6	69
332406	0,56	5	1,3	2	23	27,6	69
345308	0,58	5	1,3	2	23	27,6	69
360759	0,57	5	1,3	2	23	27,6	69
422944	0,59	5	1,3	2	23	27,6	69
499497	0,53	5	1,3	2	23	27,6	69
660416	0,56	5	1,3	2	23	27,6	69
5962	0,69	5	1,3	5	23	27,6	69
7989	0,63	5	1,3	5	23	27,6	69
9714	0,59	5	1,3	5	23	27,6	69
11393	0,60	5	1,3	5	23	27,6	69
13712	0,55	5	1,3	5	23	27,6	69
16358	0,52	5	1,3	5	23	27,6	69
18763	0,50	5	1,3	5	23	27,6	69
20928	0,49	5	1,3	5	23	27,6	69

Re	ξ	s_r (mm)	δ_r (mm)	h_r (mm)	d_{kr} (mm)	s_l (mm)	s_t (mm)
23386	0,48	5	1,3	5	23	27,6	69
25232	0,46	5	1,3	5	23	27,6	69
29009	0,44	5	1,3	5	23	27,6	69
38673	0,42	5	1,3	5	23	27,6	69
43829	0,41	5	1,3	5	23	27,6	69
47844	0,39	5	1,3	5	23	27,6	69
56721	0,37	5	1,3	5	23	27,6	69
60311	0,39	5	1,3	5	23	27,6	69
78664	0,37	5	1,3	5	23	27,6	69
82235	0,39	5	1,3	5	23	27,6	69
99525	0,37	5	1,3	5	23	27,6	69
113545	0,37	5	1,3	5	23	27,6	69
117213	0,37	5	1,3	5	23	27,6	69
131708	0,37	5	1,3	5	23	27,6	69
149366	0,38	5	1,3	5	23	27,6	69
179347	0,38	5	1,3	5	23	27,6	69
189391	0,37	5	1,3	5	23	27,6	69
221814	0,37	5	1,3	5	23	27,6	69
238030	0,38	5	1,3	5	23	27,6	69
251807	0,37	5	1,3	5	23	27,6	69
291802	0,38	5	1,3	5	23	27,6	69
309205	0,38	5	1,3	5	23	27,6	69

Re	ξ	s_r (mm)	δ_r (mm)	h_r (mm)	d_{kr} (mm)	s_l (mm)	s_t (mm)
319410	0,38	5	1,3	5	23	27,6	69
359245	0,38	5	1,3	5	23	27,6	69
392074	0,38	5	1,3	5	23	27,6	69
3457	0,35	5	1,3	10	23	27,6	69
4525	0,32	5	1,3	10	23	27,6	69
5772	0,30	5	1,3	10	23	27,6	69
6597	0,29	5	1,3	10	23	27,6	69
7644	0,26	5	1,3	10	23	27,6	69
8695	0,26	5	1,3	10	23	27,6	69
9208	0,25	5	1,3	10	23	27,6	69
10143	0,25	5	1,3	10	23	27,6	69
11242	0,24	5	1,3	10	23	27,6	69
12962	0,22	5	1,3	10	23	27,6	69
13779	0,24	5	1,3	10	23	27,6	69
18757	0,21	5	1,3	10	23	27,6	69
20520	0,20	5	1,3	10	23	27,6	69
24461	0,19	5	1,3	10	23	27,6	69
29291	0,19	5	1,3	10	23	27,6	69
29396	0,19	5	1,3	10	23	27,6	69
38564	0,19	5	1,3	10	23	27,6	69
45315	0,18	5	1,3	10	23	27,6	69
49063	0,18	5	1,3	10	23	27,6	69

Re	ξ	s_r (mm)	δ_r (mm)	h_r (mm)	d_{kr} (mm)	s_l (mm)	s_t (mm)
57154	0,18	5	1,3	10	23	27,6	69
61166	0,18	5	1,3	10	23	27,6	69
75308	0,18	5	1,3	10	23	27,6	69
77260	0,18	5	1,3	10	23	27,6	69
94440	0,18	5	1,3	10	23	27,6	69
95557	0,18	5	1,3	10	23	27,6	69
102330	0,18	5	1,3	10	23	27,6	69
106689	0,18	5	1,3	10	23	27,6	69
121160	0,18	5	1,3	10	23	27,6	69
148864	0,18	5	1,3	10	23	27,6	69
148037	0,18	5	1,3	10	23	27,6	69
172722	0,18	5	1,3	10	23	27,6	69
192222	0,18	5	1,3	10	23	27,6	69
2836	0,25	5	1,3	15	23	41,4	72
3834	0,24	5	1,3	15	23	41,4	72
4595	0,22	5	1,3	15	23	41,4	72
5737	0,21	5	1,3	15	23	41,4	72
6587	0,20	5	1,3	15	23	41,4	72
7480	0,19	5	1,3	15	23	41,4	72
8549	0,19	5	1,3	15	23	41,4	72
9778	0,18	5	1,3	15	23	41,4	72
10739	0,17	5	1,3	15	23	41,4	72

Re	ξ	s_r (mm)	δ_r (mm)	h_r (mm)	d_{kr} (mm)	s_l (mm)	s_t (mm)
11667	0,17	5	1,3	15	23	41,4	72
12484	0,16	5	1,3	15	23	41,4	72
14080	0,17	5	1,3	15	23	41,4	72
19401	0,14	5	1,3	15	23	41,4	72
21841	0,14	5	1,3	15	23	41,4	72
24490	0,12	5	1,3	15	23	41,4	72
30623	0,12	5	1,3	15	23	41,4	72
30261	0,11	5	1,3	15	23	41,4	72
39847	0,11	5	1,3	15	23	41,4	72
42656	0,11	5	1,3	15	23	41,4	72
50229	0,11	5	1,3	15	23	41,4	72
58977	0,11	5	1,3	15	23	41,4	72
60321	0,11	5	1,3	15	23	41,4	72
67105	0,11	5	1,3	15	23	41,4	72
76443	0,12	5	1,3	15	23	41,4	72
88507	0,12	5	1,3	15	23	41,4	72
96713	0,12	5	1,3	15	23	41,4	72
108112	0,12	5	1,3	15	23	41,4	72
112925	0,12	5	1,3	15	23	41,4	72
119563	0,12	5	1,3	15	23	41,4	72
136496	0,12	5	1,3	15	23	41,4	72
146958	0,12	5	1,3	15	23	41,4	72

Re	ξ	s_r (mm)	δ_r (mm)	h_r (mm)	d_{kr} (mm)	s_l (mm)	s_t (mm)
151529	0,12	5	1,3	15	23	41,4	72
166873	0,12	5	1,3	15	23	41,4	72
187993	0,12	5	1,3	15	23	41,4	72
3045	0,19	5	1,3	20	23	54,1	72
3829	0,17	5	1,3	20	23	54,1	72
3968	0,17	5	1,3	20	23	54,1	72
4501	0,17	5	1,3	20	23	54,1	72
5522	0,16	5	1,3	20	23	54,1	72
5744	0,15	5	1,3	20	23	54,1	72
6108	0,16	5	1,3	20	23	54,1	72
6894	0,15	5	1,3	20	23	54,1	72
7403	0,15	5	1,3	20	23	54,1	72
7619	0,14	5	1,3	20	23	54,1	72
8005	0,14	5	1,3	20	23	54,1	72
8838	0,14	5	1,3	20	23	54,1	72
9676	0,13	5	1,3	20	23	54,1	72
9965	0,13	5	1,3	20	23	54,1	72
10994	0,12	5	1,3	20	23	54,1	72
11951	0,12	5	1,3	20	23	54,1	72
14324	0,12	5	1,3	20	23	54,1	72
18109	0,11	5	1,3	20	23	54,1	72
20206	0,10	5	1,3	20	23	54,1	72

Re	ξ	s_r (mm)	δ_r (mm)	h_r (mm)	d_{kr} (mm)	s_l (mm)	s_t (mm)
22854	0,10	5	1,3	20	23	54,1	72
26294	0,10	5	1,3	20	23	54,1	72
27651	0,10	5	1,3	20	23	54,1	72
34400	0,10	5	1,3	20	23	54,1	72
38537	0,10	5	1,3	20	23	54,1	72
41983	0,10	5	1,3	20	23	54,1	72
48818	0,10	5	1,3	20	23	54,1	72
53145	0,11	5	1,3	20	23	54,1	72
59556	0,11	5	1,3	20	23	54,1	72
68374	0,11	5	1,3	20	23	54,1	72
78362	0,10	5	1,3	20	23	54,1	72
78505	0,11	5	1,3	20	23	54,1	72
85796	0,11	5	1,3	20	23	54,1	72
97038	0,10	5	1,3	20	23	54,1	72
99037	0,11	5	1,3	20	23	54,1	72
102692	0,10	5	1,3	20	23	54,1	72
117612	0,11	5	1,3	20	23	54,1	72
126551	0,10	5	1,3	20	23	54,1	72
133534	0,10	5	1,3	20	23	54,1	72
149168	0,11	5	1,3	20	23	54,1	72
171044	0,10	5	1,3	20	23	54,1	72
5924	0,44	8	1,3	10	23	27,6	69

Re	ξ	s_r (mm)	δ_r (mm)	h_r (mm)	d_{kr} (mm)	s_l (mm)	s_t (mm)
6975	0,42	8	1,3	10	23	27,6	69
8218	0,40	8	1,3	10	23	27,6	69
9735	0,37	8	1,3	10	23	27,6	69
10574	0,37	8	1,3	10	23	27,6	69
11996	0,35	8	1,3	10	23	27,6	69
13297	0,34	8	1,3	10	23	27,6	69
14574	0,32	8	1,3	10	23	27,6	69
16144	0,32	8	1,3	10	23	27,6	69
17637	0,30	8	1,3	10	23	27,6	69
17737	0,31	8	1,3	10	23	27,6	69
19474	0,30	8	1,3	10	23	27,6	69
28770	0,27	8	1,3	10	23	27,6	69
36086	0,24	8	1,3	10	23	27,6	69
40993	0,24	8	1,3	10	23	27,6	69
41763	0,24	8	1,3	10	23	27,6	69
45208	0,24	8	1,3	10	23	27,6	69
46012	0,24	8	1,3	10	23	27,6	69
73538	0,24	8	1,3	10	23	27,6	69
81760	0,23	8	1,3	10	23	27,6	69
86161	0,24	8	1,3	10	23	27,6	69
102097	0,24	8	1,3	10	23	27,6	69
115315	0,24	8	1,3	10	23	27,6	69

Re	ξ	s_r (mm)	δ_r (mm)	h_r (mm)	d_{kr} (mm)	s_l (mm)	s_t (mm)
127590	0,24	8	1,3	10	23	27,6	69
154079	0,25	8	1,3	10	23	27,6	69
157841	0,24	8	1,3	10	23	27,6	69
174997	0,24	8	1,3	10	23	27,6	69
177887	0,25	8	1,3	10	23	27,6	69
196107	0,25	8	1,3	10	23	27,6	69
226698	0,25	8	1,3	10	23	27,6	69
235915	0,24	8	1,3	10	23	27,6	69
289743	0,25	8	1,3	10	23	27,6	69

10.2.4 P. W. Eckels and T. J. Rabas, "Heat transfer and pressure drop of typical air cooler finned tubes" *Transactions of the ASME*, vol. 107, pp. 198-204, 1985.

Re	ξ	s_r (mm)	δ_r (mm)	h_r (mm)	d_{kr} (mm)	s_t (mm)	s_t (mm)
731	0,36	2,31	0,38	15,87	26,87	55	63,5
927	0,32	2,31	0,38	15,87	26,87	55	63,5
1177	0,29	2,31	0,38	15,87	26,87	55	63,5
1441	0,27	2,31	0,38	15,87	26,87	55	63,5
1706	0,25	2,31	0,38	15,87	26,87	55	63,5

10.3 Експериментални подаци из отворене литературе – прелаз топлоте

Коришћене ознаке:

- Re – Рејнолдсов број;
- Nu – Нуселтов број;
- Pr – Прантлов број;
- s_r (mm) – корак ребра;
- δ_r (mm) – дебљина ребра;
- h_r (mm) – висина ребра;
- d_{kr} (mm) – пречник у корену ребра;
- s_l (mm) – подужни корак цеви;
- s_t (mm) – попречни корак цеви;

10.3.1 S. L. Jameson and N. Y. Schenectady, "Tube spacing in finned tube banks" *Transaction of the A.S.M.E*, vol. 67, no. 8, pp. 633-642, 1945.

Re	Nu / Pr ^{1/3}	s _r (mm)	δ _r (mm)	h _r (mm)	d _{kr} (mm)	s _t (mm)	s _t (mm)
1271	27,18	3,63	0,25	6,05	16,89	34,29	31,29
3833	66,97	3,63	0,25	6,05	16,89	34,29	31,29
6395	86,69	3,63	0,25	6,05	16,89	34,29	31,29
8957	86,36	3,63	0,25	6,05	16,89	34,29	31,29
1252	25,35	2,92	0,25	6,05	16,89	34,29	31,29
2658	45,02	2,92	0,25	6,05	16,89	34,29	31,29
4064	55,39	2,92	0,25	6,05	16,89	34,29	31,29
5469	56,45	2,92	0,25	6,05	16,89	34,29	31,29
2246	37,97	2,92	0,25	6,05	16,89	34,29	46,93
4383	62,91	2,92	0,25	6,05	16,89	34,29	46,93
6520	76,92	2,92	0,25	6,05	16,89	34,29	46,93
8657	80,01	2,92	0,25	6,05	16,89	34,29	46,93
1333	23,38	2,81	0,31	8,75	20,27	44,45	39,55
2306	36,29	2,81	0,31	8,75	20,27	44,45	39,55
3279	45,71	2,81	0,31	8,75	20,27	44,45	39,55
4253	51,64	2,81	0,31	8,75	20,27	44,45	39,55
1512	24,49	2,81	0,31	8,75	20,27	44,45	50,34
2695	38,94	2,81	0,31	8,75	20,27	44,45	50,34
3879	49,27	2,81	0,31	8,75	20,27	44,45	50,34
5062	55,46	2,81	0,31	8,75	20,27	44,45	50,34

Re	Nu / Pr ^{1/3}	s _r (mm)	δ _r (mm)	h _r (mm)	d _{kr} (mm)	s _l (mm)	s _t (mm)
1985	29,62	2,81	0,31	8,75	20,27	44,45	69,21
4094	53,51	2,81	0,31	8,75	20,27	44,45	69,21
6203	69,57	2,81	0,31	8,75	20,27	44,45	69,21
8313	77,82	2,81	0,31	8,75	20,27	44,45	69,21
1304	17,39	2,81	0,31	8,75	20,27	20,38	69,21
2251	27,03	2,81	0,31	8,75	20,27	20,38	69,21
3197	34,14	2,81	0,31	8,75	20,27	20,38	69,21
4144	38,73	2,81	0,31	8,75	20,27	20,38	69,21
1312	19,46	2,81	0,31	8,75	20,27	34,93	50,34
2396	31,65	2,81	0,31	8,75	20,27	34,93	50,34
3480	40,31	2,81	0,31	8,75	20,27	34,93	50,34
4564	45,45	2,81	0,31	8,75	20,27	34,93	50,34
1481	24,10	2,89	0,31	9,06	26,61	52,40	49,76
3397	45,90	2,89	0,31	9,06	26,61	52,40	49,76
5312	57,14	2,89	0,31	9,06	26,61	52,40	49,76
7227	57,82	2,89	0,31	9,06	26,61	52,40	49,76
1588	26,01	2,89	0,31	9,06	26,61	52,40	78,21
3868	52,60	2,89	0,31	9,06	26,61	52,40	78,21
6147	66,50	2,89	0,31	9,06	26,61	52,40	78,21
8427	67,73	2,89	0,31	9,06	26,61	52,40	78,21

10.3.2 Trane, "Extended surface heat transfer equipment" *Trane Company Bulletin DS 378, 1953.*

Re	Nu / Pr ^{1/3}	s _r (mm)	δ _r (mm)	h _r (mm)	d _{kr} (mm)	s _t (mm)	s _t (mm)
10000	52,43	3,46	0,46	6,86	10,56	20,38	24,77
8000	50,27	3,46	0,46	6,86	10,56	20,38	24,77
6000	40,54	3,46	0,46	6,86	10,56	20,38	24,77
5000	36,96	3,46	0,46	6,86	10,56	20,38	24,77
4000	32,92	3,46	0,46	6,86	10,56	20,38	24,77
3000	28,42	3,46	0,46	6,86	10,56	20,38	24,77
2500	26,01	3,46	0,46	6,86	10,56	20,38	24,77
2000	23,24	3,46	0,46	6,86	10,56	20,38	24,77
1500	20,07	3,46	0,46	6,86	10,56	20,38	24,77
1200	17,92	3,46	0,46	6,86	10,56	20,38	24,77
1000	16,35	3,46	0,46	6,86	10,56	20,38	24,77
800	14,60	3,46	0,46	6,86	10,56	20,38	24,77
600	12,21	3,46	0,46	6,86	10,56	20,38	24,77
6000	53,06	2,92	0,46	6,86	10,56	20,38	24,77
5000	46,96	2,92	0,46	6,86	10,56	20,38	24,77
4000	40,58	2,92	0,46	6,86	10,56	20,38	24,77
3000	33,73	2,92	0,46	6,86	10,56	20,38	24,77
2500	30,16	2,92	0,46	6,86	10,56	20,38	24,77
2000	26,32	2,92	0,46	6,86	10,56	20,38	24,77
1500	22,21	2,92	0,46	6,86	10,56	20,38	24,77
1200	19,58	2,92	0,46	6,86	10,56	20,38	24,77

Re	Nu / Pr^{1/3}	s_r (mm)	δ_r (mm)	h_r (mm)	d_{kr} (mm)	s_l (mm)	s_t (mm)
1000	17,69	2,92	0,46	6,86	10,56	20,38	24,77
800	15,68	2,92	0,46	6,86	10,56	20,38	24,77
600	16,24	2,92	0,46	6,86	10,56	20,38	24,77
500	14,77	2,92	0,46	6,86	10,56	20,38	24,77
8000	72,45	2,92	0,48	5,6	11,64	20,38	24,77
6000	58,34	2,92	0,48	5,6	11,64	20,38	24,77
5000	51,60	2,92	0,48	5,6	11,64	20,38	24,77
4000	44,57	2,92	0,48	5,6	11,64	20,38	24,77
3000	37,43	2,92	0,48	5,6	11,64	20,38	24,77
2500	33,53	2,92	0,48	5,6	11,64	20,38	24,77
2000	29,38	2,92	0,48	5,6	11,64	20,38	24,77
1500	24,91	2,92	0,48	5,6	11,64	20,38	24,77
1200	21,89	2,92	0,48	5,6	11,64	20,38	24,77
1000	19,73	2,92	0,48	5,6	11,64	20,38	24,77
800	17,08	2,92	0,48	5,6	11,64	20,38	24,77
600	14,99	2,92	0,48	5,6	11,64	20,38	24,77
500	13,59	2,92	0,48	5,6	11,64	20,38	24,77

10.3.3 В. Ф. Юдин, Теплообмен поперечно - оребренных труб, Ленинград: Ленинград "Машиностроение", 1982.

Re	Nu / Pr^{1/3}	s_r (mm)	δ_r (mm)	h_r (mm)	d_{kr} (mm)	s_l (mm)	s_t (mm)
2771	33,71	6	1,3	9	32	38,4	64
3384	37,88	6	1,3	9	32	38,4	64
3923	40,71	6	1,3	9	32	38,4	64
4536	44,64	6	1,3	9	32	38,4	64
5051	47,54	6	1,3	9	32	38,4	64
5787	52,65	6	1,3	9	32	38,4	64
6816	55,48	6	1,3	9	32	38,4	64
7699	60,74	6	1,3	9	32	38,4	64
8827	65,45	6	1,3	9	32	38,4	64
9857	70,56	6	1,3	9	32	38,4	64
10862	74,65	6	1,3	9	32	38,4	64
2354	26,77	6	1,3	9	32	38,4	64
2991	29,99	6	1,3	9	32	38,4	64
3506	33,54	6	1,3	9	32	38,4	64
3997	37,31	6	1,3	9	32	38,4	64
4561	40,07	6	1,3	9	32	38,4	64
5198	42,74	6	1,3	9	32	38,4	64
5836	46,04	6	1,3	9	32	38,4	64
6669	49,74	6	1,3	9	32	38,4	64
8140	56,10	6	1,3	9	32	38,4	64

Re	Nu / Pr ^{1/3}	s_r (mm)	δ_r (mm)	h_r (mm)	d_{kr} (mm)	s_l (mm)	s_t (mm)
9146	60,98	6	1,3	9	32	38,4	64
10225	66,09	6	1,3	9	32	38,4	64
5558	69,36	6	1,3	9	32	64	64
7397	81,66	6	1,3	9	32	64	64
8704	90,16	6	1,3	9	32	64	64
9849	94,42	6	1,3	9	32	64	64
10421	101,07	6	1,3	9	32	64	64
12260	110,10	6	1,3	9	32	64	64
13649	118,45	6	1,3	9	32	64	64
15161	124,25	6	1,3	9	32	64	64
17000	133,96	6	1,3	9	32	64	64
19942	146,92	6	1,3	9	32	64	64
4536	52,58	6	1,3	9	32	64	64
5353	58,38	6	1,3	9	32	64	64
5762	62,64	6	1,3	9	32	64	64
6784	71,17	6	1,3	9	32	64	64
7560	75,09	6	1,3	9	32	64	64
9358	87,20	6	1,3	9	32	64	64
11156	95,21	6	1,3	9	32	64	64
12587	103,92	6	1,3	9	32	64	64
14712	116,02	6	1,3	9	32	64	64
16264	123,87	6	1,3	9	32	64	64

Re	Nu / Pr ^{1/3}	s _r (mm)	δ _r (mm)	h _r (mm)	d _{kr} (mm)	s _t (mm)	s _t (mm)
18676	136,15	6	1,3	9	32	64	64
5762	94,13	6	1,3	9	32	96	64
7724	112,08	6	1,3	9	32	96	64
9011	121,77	6	1,3	9	32	96	64
10421	134,89	6	1,3	9	32	96	64
11708	141,74	6	1,3	9	32	96	64
13853	156,85	6	1,3	9	32	96	64
16305	174,52	6	1,3	9	32	96	64
19064	191,07	6	1,3	9	32	96	64
22926	209,89	6	1,3	9	32	96	64
25010	228,14	6	1,3	9	32	96	64
28381	238,68	6	1,3	9	32	96	64
6620	91,72	6	1,3	9	32	96	64
7724	100,59	6	1,3	9	32	96	64
9011	110,58	6	1,3	9	32	96	64
10175	122,28	6	1,3	9	32	96	64
11524	133,71	6	1,3	9	32	96	64
13118	150,84	6	1,3	9	32	96	64
16183	169,66	6	1,3	9	32	96	64
20719	198,17	6	1,3	9	32	96	64
23722	215,86	6	1,3	9	32	96	64
4865	62,24	6	1,3	9	32	38,4	96

Re	Nu / Pr ^{1/3}	s _r (mm)	δ _r (mm)	h _r (mm)	d _{kr} (mm)	s _t (mm)	s _t (mm)
6358	73,46	6	1,3	9	32	38,4	96
7409	81,13	6	1,3	9	32	38,4	96
8736	89,09	6	1,3	9	32	38,4	96
10450	99,71	6	1,3	9	32	38,4	96
10947	104,73	6	1,3	9	32	38,4	96
13877	115,35	6	1,3	9	32	38,4	96
16863	130,98	6	1,3	9	32	38,4	96
18853	140,13	6	1,3	9	32	38,4	96
21894	152,96	6	1,3	9	32	38,4	96
3981	40,89	6	1,3	9	32	38,4	96
4976	46,35	6	1,3	9	32	38,4	96
5916	51,36	6	1,3	9	32	38,4	96
6579	58,15	6	1,3	9	32	38,4	96
7353	62,14	6	1,3	9	32	38,4	96
8680	71,43	6	1,3	9	32	38,4	96
10394	77,48	6	1,3	9	32	38,4	96
13214	89,43	6	1,3	9	32	38,4	96
15481	100,79	6	1,3	9	32	38,4	96
17416	109,64	6	1,3	9	32	38,4	96
20014	119,52	6	1,3	9	32	38,4	96
7372	100,07	6	1,3	9	32	64	96
8938	107,49	6	1,3	9	32	64	96

Re	$Nu / Pr^{1/3}$	s_r (mm)	δ_r (mm)	h_r (mm)	d_{kr} (mm)	s_l (mm)	s_t (mm)
10781	123,17	6	1,3	9	32	64	96
12163	137,42	6	1,3	9	32	64	96
14651	151,68	6	1,3	9	32	64	96
17969	171,64	6	1,3	9	32	64	96
21194	190,74	6	1,3	9	32	64	96
25064	209,57	6	1,3	9	32	64	96
30409	236,66	6	1,3	9	32	64	96
36214	263,46	6	1,3	9	32	64	96
41006	280,00	6	1,3	9	32	64	96
45337	299,39	6	1,3	9	32	64	96
7740	77,07	6	1,3	9	32	64	96
8662	83,06	6	1,3	9	32	64	96
9768	92,76	6	1,3	9	32	64	96
10966	100,18	6	1,3	9	32	64	96
12624	109,88	6	1,3	9	32	64	96
14744	126,43	6	1,3	9	32	64	96
17324	140,13	6	1,3	9	32	64	96
20457	157,24	6	1,3	9	32	64	96
23682	172,65	6	1,3	9	32	64	96
26354	188,91	6	1,3	9	32	64	96
31330	206,02	6	1,3	9	32	64	96
35569	222,27	6	1,3	9	32	64	96

Re	Nu / Pr ^{1/3}	s _r (mm)	δ _r (mm)	h _r (mm)	d _{kr} (mm)	s _t (mm)	s _t (mm)
39900	238,54	6	1,3	9	32	64	96
13131	151,84	6	1,3	9	32	96	96
15343	171,97	6	1,3	9	32	96	96
17692	187,98	6	1,3	9	32	96	96
20871	214,05	6	1,3	9	32	96	96
23912	231,00	6	1,3	9	32	96	96
30823	272,15	6	1,3	9	32	96	96
27921	250,62	6	1,3	9	32	96	96
46995	340,72	6	1,3	9	32	96	96
60956	397,88	6	1,3	9	32	96	96
36214	300,97	6	1,3	9	32	96	96
43402	337,57	6	1,3	9	32	96	96
57224	393,37	6	1,3	9	32	96	96
71046	436,85	6	1,3	9	32	96	96
12302	129,55	6	1,3	9	32	96	96
14099	143,74	6	1,3	9	32	96	96
16725	166,63	6	1,3	9	32	96	96
19904	179,43	6	1,3	9	32	96	96
23774	208,27	6	1,3	9	32	96	96
27506	228,86	6	1,3	9	32	96	96
31791	251,28	6	1,3	9	32	96	96
36905	276,44	6	1,3	9	32	96	96

Re	Nu / Pr ^{1/3}	s_r (mm)	δ_r (mm)	h_r (mm)	d_{kr} (mm)	s_l (mm)	s_t (mm)
42987	301,17	6	1,3	9	32	96	96
51418	336,86	6	1,3	9	32	96	96
62338	389,01	6	1,3	9	32	96	96
2648	30,09	6	1,3	9	32	38,4	64
3408	34,96	6	1,3	9	32	38,4	64
4315	42,19	6	1,3	9	32	38,4	64
4855	45,80	6	1,3	9	32	38,4	64
5517	49,26	6	1,3	9	32	38,4	64
6105	53,27	6	1,3	9	32	38,4	64
6816	56,73	6	1,3	9	32	38,4	64
7920	61,84	6	1,3	9	32	38,4	64
8999	68,05	6	1,3	9	32	38,4	64
9979	74,26	6	1,3	9	32	38,4	64
10862	79,05	6	1,3	9	32	38,4	64
11794	82,74	6	1,3	9	32	38,4	64
4230	48,59	6	1,3	9	32	48	64
5486	57,85	6	1,3	9	32	48	64
6559	62,93	6	1,3	9	32	48	64
7816	72,31	6	1,3	9	32	48	64
8704	73,44	6	1,3	9	32	48	64
9716	78,52	6	1,3	9	32	48	64
10911	86,65	6	1,3	9	32	48	64

Re	Nu / Pr ^{1/3}	s _r (mm)	δ _r (mm)	h _r (mm)	d _{kr} (mm)	s _t (mm)	s _t (mm)
12321	90,95	6	1,3	9	32	48	64
13424	97,62	6	1,3	9	32	48	64
14712	103,38	6	1,3	9	32	48	64
15723	108,24	6	1,3	9	32	48	64
4087	64,56	6	1,3	9	32	64	64
4659	70,02	6	1,3	9	32	64	64
6130	82,45	6	1,3	9	32	64	64
8337	96,94	6	1,3	9	32	64	64
9072	104,27	6	1,3	9	32	64	64
11279	115,84	6	1,3	9	32	64	64
12587	126,57	6	1,3	9	32	64	64
14262	131,51	6	1,3	9	32	64	64
17245	144,80	6	1,3	9	32	64	64
19125	154,17	6	1,3	9	32	64	64
20760	163,55	6	1,3	9	32	64	64
22926	170,36	6	1,3	9	32	64	64
6314	94,10	6	1,3	9	32	96	64
8153	114,64	6	1,3	9	32	96	64
10237	137,73	6	1,3	9	32	96	64
11524	143,72	6	1,3	9	32	96	64
12566	152,85	6	1,3	9	32	96	64
14528	162,26	6	1,3	9	32	96	64

Re	Nu / Pr ^{1/3}	s _r (mm)	δ _r (mm)	h _r (mm)	d _{kr} (mm)	s _t (mm)	s _t (mm)
17531	189,35	6	1,3	9	32	96	64
18880	196,50	6	1,3	9	32	96	64
21516	211,59	6	1,3	9	32	96	64
22803	219,03	6	1,3	9	32	96	64
25439	235,29	6	1,3	9	32	96	64
28504	250,97	6	1,3	9	32	96	64
5108	55,61	6	1,3	9	32	38,4	80
6105	62,05	6	1,3	9	32	38,4	80
7223	69,51	6	1,3	9	32	38,4	80
8300	76,06	6	1,3	9	32	38,4	80
9657	83,86	6	1,3	9	32	38,4	80
11173	90,64	6	1,3	9	32	38,4	80
12689	98,33	6	1,3	9	32	38,4	80
14485	106,47	6	1,3	9	32	38,4	80
16201	114,49	6	1,3	9	32	38,4	80
17558	120,93	6	1,3	9	32	38,4	80
8646	95,19	6	1,3	9	32	64	80
10309	107,03	6	1,3	9	32	64	80
12171	118,42	6	1,3	9	32	64	80
14365	130,26	6	1,3	9	32	64	80
17225	145,06	6	1,3	9	32	64	80
19553	155,76	6	1,3	9	32	64	80

Re	Nu / Pr ^{1/3}	s _r (mm)	δ _r (mm)	h _r (mm)	d _{kr} (mm)	s _l (mm)	s _l (mm)
22213	169,88	6	1,3	9	32	64	80
24275	181,50	6	1,3	9	32	64	80
27999	196,08	6	1,3	9	32	64	80
30726	208,60	6	1,3	9	32	64	80
33386	217,26	6	1,3	9	32	64	80
36246	225,45	6	1,3	9	32	64	80
12769	137,75	6	1,3	9	32	96	80
14465	158,91	6	1,3	9	32	96	80
16660	170,04	6	1,3	9	32	96	80
19254	190,10	6	1,3	9	32	96	80
22645	207,92	6	1,3	9	32	96	80
25938	226,11	6	1,3	9	32	96	80
28132	235,39	6	1,3	9	32	96	80
31624	259,89	6	1,3	9	32	96	80
37011	282,91	6	1,3	9	32	96	80
41700	304,82	6	1,3	9	32	96	80
44593	323,02	6	1,3	9	32	96	80
48583	336,75	6	1,3	9	32	96	80
52972	338,24	6	1,3	9	32	96	80
5529	66,20	6	1,3	9	32	38,4	96
6469	75,48	6	1,3	9	32	38,4	96
8901	89,34	6	1,3	9	32	38,4	96

Re	Nu / Pr ^{1/3}	s _r (mm)	δ _r (mm)	h _r (mm)	d _{kr} (mm)	s _t (mm)	s _t (mm)
9675	94,21	6	1,3	9	32	38,4	96
10947	100,85	6	1,3	9	32	38,4	96
11666	103,65	6	1,3	9	32	38,4	96
13435	113,53	6	1,3	9	32	38,4	96
14375	118,54	6	1,3	9	32	38,4	96
16918	129,45	6	1,3	9	32	38,4	96
19019	138,59	6	1,3	9	32	38,4	96
20623	143,75	6	1,3	9	32	38,4	96
24051	156,28	6	1,3	9	32	38,4	96
9768	110,05	6	1,3	9	32	64	96
11334	118,61	6	1,3	9	32	64	96
11795	128,90	6	1,3	9	32	64	96
14467	145,71	6	1,3	9	32	64	96
16679	161,97	6	1,3	9	32	64	96
20733	182,50	6	1,3	9	32	64	96
23682	201,04	6	1,3	9	32	64	96
28566	227,56	6	1,3	9	32	64	96
35108	256,65	6	1,3	9	32	64	96
40361	276,04	6	1,3	9	32	64	96
47917	310,83	6	1,3	9	32	64	96
15895	194,38	6	1,3	9	32	96	96
22254	239,20	6	1,3	9	32	96	96

Re	$Nu / Pr^{1/3}$	s_r (mm)	δ_r (mm)	h_r (mm)	d_{kr} (mm)	s_l (mm)	s_t (mm)
25156	266,19	6	1,3	9	32	96	96
27783	272,59	6	1,3	9	32	96	96
30547	298,20	6	1,3	9	32	96	96
33450	314,67	6	1,3	9	32	96	96
36490	333,88	6	1,3	9	32	96	96
40637	354,46	6	1,3	9	32	96	96
45475	379,61	6	1,3	9	32	96	96
51695	430,83	6	1,3	9	32	96	96
55980	436,78	6	1,3	9	32	96	96
61370	455,98	6	1,3	9	32	96	96
65655	463,76	6	1,3	9	32	96	96
71599	490,74	6	1,3	9	32	96	96
21931	226,04	6	1,3	9	32	112	96
25801	260,27	6	1,3	9	32	112	96
28865	281,46	6	1,3	9	32	112	96
32413	302,65	6	1,3	9	32	112	96
34509	311,88	6	1,3	9	32	112	96
37734	333,07	6	1,3	9	32	112	96
40960	360,23	6	1,3	9	32	112	96
48377	385,77	6	1,3	9	32	112	96
51764	405,32	6	1,3	9	32	112	96
56440	417,27	6	1,3	9	32	112	96

Re	Nu / Pr ^{1/3}	s _r (mm)	δ _r (mm)	h _r (mm)	d _{kr} (mm)	s _l (mm)	s _l (mm)
64987	457,46	6	1,3	9	32	112	96
71921	482,46	6	1,3	9	32	112	96
79339	517,78	6	1,3	9	32	112	96
87402	536,79	6	1,3	9	32	112	96
9521	78,14	6	1,3	9	32	38,4	132,8
12694	98,07	6	1,3	9	32	38,4	132,8
16231	120,26	6	1,3	9	32	38,4	132,8
18407	131,13	6	1,3	9	32	38,4	132,8
20583	141,54	6	1,3	9	32	38,4	132,8
24028	157,39	6	1,3	9	32	38,4	132,8
27927	178,00	6	1,3	9	32	38,4	132,8
34456	206,07	6	1,3	9	32	38,4	132,8
39080	222,38	6	1,3	9	32	38,4	132,8
43705	239,58	6	1,3	9	32	38,4	132,8
47785	253,62	6	1,3	9	32	38,4	132,8
15112	158,43	6	1,3	9	32	64	132,8
17984	176,35	6	1,3	9	32	64	132,8
23273	210,13	6	1,3	9	32	64	132,8
29015	240,98	6	1,3	9	32	64	132,8
32793	263,91	6	1,3	9	32	64	132,8
35967	276,00	6	1,3	9	32	64	132,8
40652	298,93	6	1,3	9	32	64	132,8

Re	Nu / Pr ^{1/3}	s _r (mm)	δ _r (mm)	h _r (mm)	d _{kr} (mm)	s _t (mm)	s _t (mm)
43825	312,27	6	1,3	9	32	64	132,8
55008	366,90	6	1,3	9	32	64	132,8
61960	391,09	6	1,3	9	32	64	132,8
68912	419,36	6	1,3	9	32	64	132,8
76921	450,21	6	1,3	9	32	64	132,8
83117	471,06	6	1,3	9	32	64	132,8
92789	514,00	6	1,3	9	32	64	132,8
20628	235,83	6	1,3	9	32	96	132,8
25615	262,68	6	1,3	9	32	96	132,8
29695	292,16	6	1,3	9	32	96	132,8
35589	327,54	6	1,3	9	32	96	132,8
44430	392,39	6	1,3	9	32	96	132,8
50324	417,94	6	1,3	9	32	96	132,8
62791	477,55	6	1,3	9	32	96	132,8
82739	576,46	6	1,3	9	32	96	132,8
94073	632,14	6	1,3	9	32	96	132,8
106314	663,58	6	1,3	9	32	96	132,8
114475	705,50	6	1,3	9	32	96	132,8
125129	745,46	6	1,3	9	32	96	132,8
135330	779,52	6	1,3	9	32	96	132,8
4983	37,30	2	1,3	5	23	34,5	64,86
7936	53,06	2	1,3	5	23	34,5	64,86

Re	Nu / Pr ^{1/3}	s _r (mm)	δ _r (mm)	h _r (mm)	d _{kr} (mm)	s _l (mm)	s _l (mm)
9708	61,02	2	1,3	5	23	34,5	64,86
11775	67,46	2	1,3	5	23	34,5	64,86
13805	73,83	2	1,3	5	23	34,5	64,86
15983	82,86	2	1,3	5	23	34,5	64,86
16315	84,35	2	1,3	5	23	34,5	64,86
20191	95,72	2	1,3	5	23	34,5	64,86
22960	114,46	2	1,3	5	23	34,5	64,86
24731	109,14	2	1,3	5	23	34,5	64,86
28718	120,53	2	1,3	5	23	34,5	64,86
32299	128,45	2	1,3	5	23	34,5	64,86
33148	136,03	2	1,3	5	23	34,5	64,86
39127	146,64	2	1,3	5	23	34,5	64,86
46879	171,29	2	1,3	5	23	34,5	64,86
54631	188,02	2	1,3	5	23	34,5	64,86
67181	211,38	2	1,3	5	23	34,5	64,86
82684	238,72	2	1,3	5	23	34,5	64,86
98188	275,23	2	1,3	5	23	34,5	64,86
107047	296,26	2	1,3	5	23	34,5	64,86
108523	311,76	2	1,3	5	23	34,5	64,86
121074	333,94	2	1,3	5	23	34,5	64,86
124765	310,67	2	1,3	5	23	34,5	64,86
133255	323,02	2	1,3	5	23	34,5	64,86

Re	Nu / Pr ^{1/3}	s _r (mm)	δ _r (mm)	h _r (mm)	d _{kr} (mm)	s _i (mm)	s _i (mm)
140637	334,96	2	1,3	5	23	34,5	64,86
147651	356,52	2	1,3	5	23	34,5	64,86
156879	366,85	2	1,3	5	23	34,5	64,86
174228	373,75	2	1,3	5	23	34,5	64,86
196745	429,32	2	1,3	5	23	34,5	64,86
2217	13,26	2	1,3	10	23	36,8	69
3097	16,38	2	1,3	10	23	36,8	69
4163	19,12	2	1,3	10	23	36,8	69
4975	22,88	2	1,3	10	23	36,8	69
5245	22,39	2	1,3	10	23	36,8	69
6785	26,34	2	1,3	10	23	36,8	69
7361	27,07	2	1,3	10	23	36,8	69
8410	29,53	2	1,3	10	23	36,8	69
9848	32,50	2	1,3	10	23	36,8	69
11049	34,18	2	1,3	10	23	36,8	69
15026	42,61	2	1,3	10	23	36,8	69
19053	47,37	2	1,3	10	23	36,8	69
22386	52,13	2	1,3	10	23	36,8	69
23012	51,94	2	1,3	10	23	36,8	69
23012	53,04	2	1,3	10	23	36,8	69
24992	53,22	2	1,3	10	23	36,8	69
31811	61,62	2	1,3	10	23	36,8	69

Re	Nu / Pr ^{1/3}	s_r (mm)	δ_r (mm)	h_r (mm)	d_{kr} (mm)	s_l (mm)	s_l (mm)
31930	64,82	2	1,3	10	23	36,8	69
33334	66,07	2	1,3	10	23	36,8	69
38410	69,90	2	1,3	10	23	36,8	69
40102	75,13	2	1,3	10	23	36,8	69
44502	75,45	2	1,3	10	23	36,8	69
46363	80,17	2	1,3	10	23	36,8	69
48224	76,70	2	1,3	10	23	36,8	69
52962	80,90	2	1,3	10	23	36,8	69
53470	83,26	2	1,3	10	23	36,8	69
57362	91,21	2	1,3	10	23	36,8	69
65145	101,17	2	1,3	10	23	36,8	69
65822	98,11	2	1,3	10	23	36,8	69
83081	115,35	2	1,3	10	23	36,8	69
459	4,05	2	1,3	10	23	37,95	46
514	4,41	2	1,3	10	23	37,95	46
548	4,51	2	1,3	10	23	37,95	46
620	4,75	2	1,3	10	23	37,95	46
650	4,91	2	1,3	10	23	37,95	46
688	4,96	2	1,3	10	23	37,95	46
722	5,29	2	1,3	10	23	37,95	46
765	5,46	2	1,3	10	23	37,95	46
794	5,53	2	1,3	10	23	37,95	46

Re	Nu / Pr ^{1/3}	s _r (mm)	δ _r (mm)	h _r (mm)	d _{kr} (mm)	s _t (mm)	s _t (mm)
828	5,62	2	1,3	10	23	37,95	46
888	5,84	2	1,3	10	23	37,95	46
922	6,40	2	1,3	10	23	37,95	46
973	6,22	2	1,3	10	23	37,95	46
1019	6,90	2	1,3	10	23	37,95	46
1121	7,49	2	1,3	10	23	37,95	46
5429	52,29	2,5	1,3	5	23	34,5	64,86
7934	63,53	2,5	1,3	5	23	34,5	64,86
10579	74,89	2,5	1,3	5	23	34,5	64,86
12481	86,71	2,5	1,3	5	23	34,5	64,86
14523	96,48	2,5	1,3	5	23	34,5	64,86
15404	96,01	2,5	1,3	5	23	34,5	64,86
16935	109,92	2,5	1,3	5	23	34,5	64,86
19905	117,86	2,5	1,3	5	23	34,5	64,86
20508	111,61	2,5	1,3	5	23	34,5	64,86
24823	140,08	2,5	1,3	5	23	34,5	64,86
29787	154,11	2,5	1,3	5	23	34,5	64,86
31133	160,75	2,5	1,3	5	23	34,5	64,86
35402	178,00	2,5	1,3	5	23	34,5	64,86
39438	185,65	2,5	1,3	5	23	34,5	64,86
39995	185,39	2,5	1,3	5	23	34,5	64,86
44635	204,74	2,5	1,3	5	23	34,5	64,86

Re	Nu / Pr ^{1/3}	s _r (mm)	δ _r (mm)	h _r (mm)	d _{kr} (mm)	s _i (mm)	s _i (mm)
47975	219,74	2,5	1,3	5	23	34,5	64,86
59853	252,04	2,5	1,3	5	23	34,5	64,86
61245	256,59	2,5	1,3	5	23	34,5	64,86
68530	286,56	2,5	1,3	5	23	34,5	64,86
80408	326,92	2,5	1,3	5	23	34,5	64,86
82727	335,79	2,5	1,3	5	23	34,5	64,86
92285	359,33	2,5	1,3	5	23	34,5	64,86
99291	382,35	2,5	1,3	5	23	34,5	64,86
115067	400,84	2,5	1,3	5	23	34,5	64,86
122954	442,00	2,5	1,3	5	23	34,5	64,86
131770	472,96	2,5	1,3	5	23	34,5	64,86
146153	510,97	2,5	1,3	5	23	34,5	64,86
153113	501,32	2,5	1,3	5	23	34,5	64,86
168888	545,56	2,5	1,3	5	23	34,5	64,86
183272	627,98	2,5	1,3	5	23	34,5	64,86
187911	596,33	2,5	1,3	5	23	34,5	64,86
211110	647,62	2,5	1,3	5	23	34,5	64,86
237557	696,10	2,5	1,3	5	23	34,5	64,86
271891	705,70	2,5	1,3	5	23	34,5	64,86
2487	20,06	2,5	1,3	10	23	36,8	69
3594	24,37	2,5	1,3	10	23	36,8	69
4657	27,26	2,5	1,3	10	23	36,8	69

Re	Nu / Pr ^{1/3}	s_r (mm)	δ_r (mm)	h_r (mm)	d_{kr} (mm)	s_l (mm)	s_l (mm)
5380	30,56	2,5	1,3	10	23	36,8	69
6329	33,68	2,5	1,3	10	23	36,8	69
7143	35,28	2,5	1,3	10	23	36,8	69
7324	34,77	2,5	1,3	10	23	36,8	69
8658	40,36	2,5	1,3	10	23	36,8	69
9268	38,06	2,5	1,3	10	23	36,8	69
11257	43,97	2,5	1,3	10	23	36,8	69
13337	50,88	2,5	1,3	10	23	36,8	69
14445	49,74	2,5	1,3	10	23	36,8	69
16728	54,31	2,5	1,3	10	23	36,8	69
18875	64,19	2,5	1,3	10	23	36,8	69
19101	58,52	2,5	1,3	10	23	36,8	69
23283	68,00	2,5	1,3	10	23	36,8	69
26538	70,28	2,5	1,3	10	23	36,8	69
27420	77,36	2,5	1,3	10	23	36,8	69
31082	79,19	2,5	1,3	10	23	36,8	69
36627	84,30	2,5	1,3	10	23	36,8	69
37841	90,17	2,5	1,3	10	23	36,8	69
39491	95,88	2,5	1,3	10	23	36,8	69
44532	104,01	2,5	1,3	10	23	36,8	69
53348	105,83	2,5	1,3	10	23	36,8	69
58095	116,45	2,5	1,3	10	23	36,8	69

Re	Nu / Pr ^{1/3}	s _r (mm)	δ _r (mm)	h _r (mm)	d _{kr} (mm)	s _t (mm)	s _t (mm)
61033	114,25	2,5	1,3	10	23	36,8	69
66458	116,33	2,5	1,3	10	23	36,8	69
68493	134,48	2,5	1,3	10	23	36,8	69
82282	140,13	2,5	1,3	10	23	36,8	69
92454	159,61	2,5	1,3	10	23	36,8	69
94941	150,13	2,5	1,3	10	23	36,8	69
108052	182,77	2,5	1,3	10	23	36,8	69
120032	198,09	2,5	1,3	10	23	36,8	69
24753	1150,68	2,5	1,3	1,5	23	41,4	72
33892	1341,93	2,5	1,3	1,5	23	41,4	72
36558	1342,42	2,5	1,3	1,5	23	41,4	72
39985	1518,70	2,5	1,3	1,5	23	41,4	72
45126	1500,25	2,5	1,3	1,5	23	41,4	72
48363	1633,65	2,5	1,3	1,5	23	41,4	72
50838	1658,77	2,5	1,3	1,5	23	41,4	72
57122	1719,88	2,5	1,3	1,5	23	41,4	72
62072	1761,49	2,5	1,3	1,5	23	41,4	72
63215	1890,73	2,5	1,3	1,5	23	41,4	72
77685	2151,71	2,5	1,3	1,5	23	41,4	72
90443	2170,05	2,5	1,3	1,5	23	41,4	72
107960	2499,48	2,5	1,3	1,5	23	41,4	72
128143	2634,05	2,5	1,3	1,5	23	41,4	72

Re	Nu / Pr ^{1/3}	s _r (mm)	δ _r (mm)	h _r (mm)	d _{kr} (mm)	s _t (mm)	s _t (mm)
137282	2671,22	2,5	1,3	1,5	23	41,4	72
145279	2854,82	2,5	1,3	1,5	23	41,4	72
177648	3193,47	2,5	1,3	1,5	23	41,4	72
198022	3254,91	2,5	1,3	1,5	23	41,4	72
223346	3523,95	2,5	1,3	1,5	23	41,4	72
258951	3976,66	2,5	1,3	1,5	23	41,4	72
277992	3917,09	2,5	1,3	1,5	23	41,4	72
300841	3960,46	2,5	1,3	1,5	23	41,4	72
371291	4544,30	2,5	1,3	1,5	23	41,4	72
374147	4363,49	2,5	1,3	1,5	23	41,4	72
468397	4878,23	2,5	1,3	1,5	23	41,4	72
514095	5190,85	2,5	1,3	1,5	23	41,4	72
588353	5228,61	2,5	1,3	1,5	23	41,4	72
605489	5484,74	2,5	1,3	1,5	23	41,4	72
714021	5584,85	2,5	1,3	1,5	23	41,4	72
780662	6078,20	2,5	1,3	1,5	23	41,4	72
824456	5860,78	2,5	1,3	1,5	23	41,4	72
885385	6208,11	2,5	1,3	1,5	23	41,4	72
1003437	6758,31	2,5	1,3	1,5	23	41,4	72
1071983	6591,33	2,5	1,3	1,5	23	41,4	72
8458	81,01	3	1,3	5	23	34,5	64,86
12162	108,66	3	1,3	5	23	34,5	64,86

Re	Nu / Pr ^{1/3}	s _r (mm)	δ _r (mm)	h _r (mm)	d _{kr} (mm)	s _l (mm)	s _l (mm)
14539	129,44	3	1,3	5	23	34,5	64,86
17911	143,55	3	1,3	5	23	34,5	64,86
20012	147,62	3	1,3	5	23	34,5	64,86
21615	161,65	3	1,3	5	23	34,5	64,86
24987	174,69	3	1,3	5	23	34,5	64,86
25595	173,07	3	1,3	5	23	34,5	64,86
28414	176,90	3	1,3	5	23	34,5	64,86
31842	190,32	3	1,3	5	23	34,5	64,86
42676	261,06	3	1,3	5	23	34,5	64,86
44390	244,56	3	1,3	5	23	34,5	64,86
51134	270,01	3	1,3	5	23	34,5	64,86
60256	328,47	3	1,3	5	23	34,5	64,86
61638	318,73	3	1,3	5	23	34,5	64,86
73744	370,64	3	1,3	5	23	34,5	64,86
82257	396,92	3	1,3	5	23	34,5	64,86
85408	423,69	3	1,3	5	23	34,5	64,86
99173	432,93	3	1,3	5	23	34,5	64,86
104259	495,87	3	1,3	5	23	34,5	64,86
109455	460,08	3	1,3	5	23	34,5	64,86
125210	512,41	3	1,3	5	23	34,5	64,86
142071	571,50	3	1,3	5	23	34,5	64,86
156444	609,66	3	1,3	5	23	34,5	64,86

Re	Nu / Pr ^{1/3}	s _r (mm)	δ _r (mm)	h _r (mm)	d _{kr} (mm)	s _t (mm)	s _t (mm)
162524	663,16	3	1,3	5	23	34,5	64,86
170264	632,95	3	1,3	5	23	34,5	64,86
176897	699,18	3	1,3	5	23	34,5	64,86
192376	709,29	3	1,3	5	23	34,5	64,86
232178	741,37	3	1,3	5	23	34,5	64,86
253184	827,64	3	1,3	5	23	34,5	64,86
255948	879,15	3	1,3	5	23	34,5	64,86
295197	871,55	3	1,3	5	23	34,5	64,86
329471	1072,18	3	1,3	5	23	34,5	64,86
2446	14,97	3	1,3	10	23	27,6	69
2994	16,63	3	1,3	10	23	27,6	69
3290	17,21	3	1,3	10	23	27,6	69
3838	20,11	3	1,3	10	23	27,6	69
4365	21,60	3	1,3	10	23	27,6	69
4934	22,29	3	1,3	10	23	27,6	69
5461	24,23	3	1,3	10	23	27,6	69
6157	27,38	3	1,3	10	23	27,6	69
6790	27,42	3	1,3	10	23	27,6	69
7781	31,37	3	1,3	10	23	27,6	69
9616	36,06	3	1,3	10	23	27,6	69
11324	38,05	3	1,3	10	23	27,6	69
11956	42,69	3	1,3	10	23	27,6	69

Re	Nu / Pr ^{1/3}	s_r (mm)	δ_r (mm)	h_r (mm)	d_{kr} (mm)	s_t (mm)	s_t (mm)
13770	42,03	3	1,3	10	23	27,6	69
14655	45,29	3	1,3	10	23	27,6	69
17713	49,28	3	1,3	10	23	27,6	69
20033	54,16	3	1,3	10	23	27,6	69
20771	52,33	3	1,3	10	23	27,6	69
24039	56,99	3	1,3	10	23	27,6	69
27835	61,65	3	1,3	10	23	27,6	69
29100	61,40	3	1,3	10	23	27,6	69
34055	74,75	3	1,3	10	23	27,6	69
40592	74,04	3	1,3	10	23	27,6	69
41752	80,84	3	1,3	10	23	27,6	69
44704	81,97	3	1,3	10	23	27,6	69
47445	83,18	3	1,3	10	23	27,6	69
49554	86,21	3	1,3	10	23	27,6	69
59043	98,57	3	1,3	10	23	27,6	69
61785	96,25	3	1,3	10	23	27,6	69
66213	100,00	3	1,3	10	23	27,6	69
71695	108,60	3	1,3	10	23	27,6	69
86456	121,30	3	1,3	10	23	27,6	69
2833	12,60	3	1,3	15	23	41,4	72
3035	13,42	3	1,3	15	23	41,4	72
3661	15,06	3	1,3	15	23	41,4	72

Re	Nu / Pr^{1/3}	s_r (mm)	δ_r (mm)	h_r (mm)	d_{kr} (mm)	s_l (mm)	s_t (mm)
3973	16,08	3	1,3	15	23	41,4	72
4433	17,47	3	1,3	15	23	41,4	72
4452	17,76	3	1,3	15	23	41,4	72
4728	17,76	3	1,3	15	23	41,4	72
5261	19,99	3	1,3	15	23	41,4	72
5739	20,26	3	1,3	15	23	41,4	72
6144	20,57	3	1,3	15	23	41,4	72
6457	21,56	3	1,3	15	23	41,4	72
6567	21,32	3	1,3	15	23	41,4	72
7818	23,72	3	1,3	15	23	41,4	72
8259	24,17	3	1,3	15	23	41,4	72
9418	26,50	3	1,3	15	23	41,4	72
11497	29,43	3	1,3	15	23	41,4	72
11699	30,24	3	1,3	15	23	41,4	72
13355	31,77	3	1,3	15	23	41,4	72
15599	33,17	3	1,3	15	23	41,4	72
16372	36,82	3	1,3	15	23	41,4	72
17420	35,89	3	1,3	15	23	41,4	72
20198	40,40	3	1,3	15	23	41,4	72
23914	44,73	3	1,3	15	23	41,4	72
24834	44,91	3	1,3	15	23	41,4	72
26783	45,84	3	1,3	15	23	41,4	72

Re	Nu / Pr ^{1/3}	s _r (mm)	δ _r (mm)	h _r (mm)	d _{kr} (mm)	s _t (mm)	s _t (mm)
30168	51,27	3	1,3	15	23	41,4	72
31456	54,57	3	1,3	15	23	41,4	72
35448	56,65	3	1,3	15	23	41,4	72
38630	59,99	3	1,3	15	23	41,4	72
46172	66,15	3	1,3	15	23	41,4	72
50587	67,91	3	1,3	15	23	41,4	72
55186	71,90	3	1,3	15	23	41,4	72
78916	91,86	3	1,3	15	23	41,4	72
84250	83,99	3	1,3	15	23	41,4	72
10875	138,02	5	1,3	2	23	27,6	69
13079	152,86	5	1,3	2	23	27,6	69
16166	185,69	5	1,3	2	23	27,6	69
18517	205,91	5	1,3	2	23	27,6	69
27335	270,78	5	1,3	2	23	27,6	69
30568	297,32	5	1,3	2	23	27,6	69
32919	307,80	5	1,3	2	23	27,6	69
34683	323,80	5	1,3	2	23	27,6	69
37181	349,26	5	1,3	2	23	27,6	69
43941	377,72	5	1,3	2	23	27,6	69
56727	472,41	5	1,3	2	23	27,6	69
66279	538,15	5	1,3	2	23	27,6	69
70247	555,15	5	1,3	2	23	27,6	69

Re	Nu / Pr ^{1/3}	s _r (mm)	δ _r (mm)	h _r (mm)	d _{kr} (mm)	s _t (mm)	s _t (mm)
80093	608,23	5	1,3	2	23	27,6	69
88323	636,97	5	1,3	2	23	27,6	69
110367	814,61	5	1,3	2	23	27,6	69
111249	765,34	5	1,3	2	23	27,6	69
141082	923,59	5	1,3	2	23	27,6	69
154014	987,51	5	1,3	2	23	27,6	69
165624	1070,53	5	1,3	2	23	27,6	69
197956	1203,17	5	1,3	2	23	27,6	69
212211	1334,66	5	1,3	2	23	27,6	69
246158	1490,88	5	1,3	2	23	27,6	69
248363	1536,24	5	1,3	2	23	27,6	69
263059	1497,32	5	1,3	2	23	27,6	69
303473	1720,33	5	1,3	2	23	27,6	69
352705	2101,96	5	1,3	2	23	27,6	69
368870	2052,55	5	1,3	2	23	27,6	69
423246	2414,70	5	1,3	2	23	27,6	69
430594	2437,82	5	1,3	2	23	27,6	69
531996	2952,28	5	1,3	2	23	27,6	69
6723	73,63	5	1,3	5	23	27,6	69
7487	85,36	5	1,3	5	23	27,6	69
9015	94,73	5	1,3	5	23	27,6	69
10466	103,53	5	1,3	5	23	27,6	69

Re	$Nu / Pr^{1/3}$	s_r (mm)	δ_r (mm)	h_r (mm)	d_{kr} (mm)	s_t (mm)	s_t (mm)
12376	123,75	5	1,3	5	23	27,6	69
14591	145,28	5	1,3	5	23	27,6	69
16348	158,46	5	1,3	5	23	27,6	69
17112	169,59	5	1,3	5	23	27,6	69
20015	181,02	5	1,3	5	23	27,6	69
21543	180,53	5	1,3	5	23	27,6	69
28877	215,96	5	1,3	5	23	27,6	69
29794	239,75	5	1,3	5	23	27,6	69
35523	253,92	5	1,3	5	23	27,6	69
42017	291,19	5	1,3	5	23	27,6	69
42017	301,21	5	1,3	5	23	27,6	69
53094	338,72	5	1,3	5	23	27,6	69
54240	349,91	5	1,3	5	23	27,6	69
67074	388,74	5	1,3	5	23	27,6	69
78992	490,24	5	1,3	5	23	27,6	69
81742	440,31	5	1,3	5	23	27,6	69
91138	529,70	5	1,3	5	23	27,6	69
106952	613,41	5	1,3	5	23	27,6	69
124676	677,90	5	1,3	5	23	27,6	69
129641	735,33	5	1,3	5	23	27,6	69
132926	748,33	5	1,3	5	23	27,6	69
157754	824,89	5	1,3	5	23	27,6	69

Re	Nu / Pr ^{1/3}	s_r (mm)	δ_r (mm)	h_r (mm)	d_{kr} (mm)	s_t (mm)	s_t (mm)
161956	900,87	5	1,3	5	23	27,6	69
162720	865,78	5	1,3	5	23	27,6	69
201681	1056,36	5	1,3	5	23	27,6	69
200917	1048,01	5	1,3	5	23	27,6	69
229947	1177,56	5	1,3	5	23	27,6	69
244462	1217,79	5	1,3	5	23	27,6	69
294118	1403,42	5	1,3	5	23	27,6	69
3498	30,51	5	1,3	10	23	27,6	69
3935	29,97	5	1,3	10	23	27,6	69
4591	35,44	5	1,3	10	23	27,6	69
5101	36,11	5	1,3	10	23	27,6	69
5720	40,84	5	1,3	10	23	27,6	69
6412	43,88	5	1,3	10	23	27,6	69
7287	45,04	5	1,3	10	23	27,6	69
7432	46,10	5	1,3	10	23	27,6	69
8380	48,80	5	1,3	10	23	27,6	69
9473	56,02	5	1,3	10	23	27,6	69
10165	57,92	5	1,3	10	23	27,6	69
13735	65,86	5	1,3	10	23	27,6	69
16213	76,68	5	1,3	10	23	27,6	69
17961	76,12	5	1,3	10	23	27,6	69
21860	84,41	5	1,3	10	23	27,6	69

Re	Nu / Pr ^{1/3}	s _r (mm)	δ _r (mm)	h _r (mm)	d _{kr} (mm)	s _t (mm)	s _t (mm)
23572	93,87	5	1,3	10	23	27,6	69
25867	98,66	5	1,3	10	23	27,6	69
29984	101,97	5	1,3	10	23	27,6	69
36797	110,42	5	1,3	10	23	27,6	69
40440	122,97	5	1,3	10	23	27,6	69
43719	127,64	5	1,3	10	23	27,6	69
50860	143,89	5	1,3	10	23	27,6	69
52828	140,50	5	1,3	10	23	27,6	69
67218	166,87	5	1,3	10	23	27,6	69
67765	166,22	5	1,3	10	23	27,6	69
74687	172,30	5	1,3	10	23	27,6	69
79423	172,33	5	1,3	10	23	27,6	69
84160	194,63	5	1,3	10	23	27,6	69
98004	194,64	5	1,3	10	23	27,6	69
101647	214,26	5	1,3	10	23	27,6	69
115492	232,45	5	1,3	10	23	27,6	69
123871	241,98	5	1,3	10	23	27,6	69
151925	272,22	5	1,3	10	23	27,6	69
2973	20,71	5	1,3	15	23	41,4	72
3417	23,03	5	1,3	15	23	41,4	72
4067	26,18	5	1,3	15	23	41,4	72
4443	26,35	5	1,3	15	23	41,4	72

Re	Nu / Pr ^{1/3}	s_r (mm)	δ_r (mm)	h_r (mm)	d_{kr} (mm)	s_t (mm)	s_t (mm)
4784	28,18	5	1,3	15	23	41,4	72
5536	30,89	5	1,3	15	23	41,4	72
6254	31,99	5	1,3	15	23	41,4	72
7382	36,75	5	1,3	15	23	41,4	72
7792	35,75	5	1,3	15	23	41,4	72
8133	38,89	5	1,3	15	23	41,4	72
9876	44,23	5	1,3	15	23	41,4	72
10662	42,77	5	1,3	15	23	41,4	72
13909	52,33	5	1,3	15	23	41,4	72
14421	51,14	5	1,3	15	23	41,4	72
16984	54,55	5	1,3	15	23	41,4	72
20231	60,63	5	1,3	15	23	41,4	72
20675	59,16	5	1,3	15	23	41,4	72
26382	68,52	5	1,3	15	23	41,4	72
26724	72,23	5	1,3	15	23	41,4	72
33490	77,13	5	1,3	15	23	41,4	72
37933	86,70	5	1,3	15	23	41,4	72
40188	78,29	5	1,3	15	23	41,4	72
44939	87,92	5	1,3	15	23	41,4	72
51944	92,28	5	1,3	15	23	41,4	72
59462	106,10	5	1,3	15	23	41,4	72
59804	110,09	5	1,3	15	23	41,4	72

Re	Nu / Pr ^{1/3}	s _r (mm)	δ _r (mm)	h _r (mm)	d _{kr} (mm)	s _t (mm)	s _t (mm)
66981	114,59	5	1,3	15	23	41,4	72
77233	124,84	5	1,3	15	23	41,4	72
85434	136,42	5	1,3	15	23	41,4	72
95003	129,31	5	1,3	15	23	41,4	72
101496	153,81	5	1,3	15	23	41,4	72
114824	154,26	5	1,3	15	23	41,4	72
124051	173,87	5	1,3	15	23	41,4	72
139429	195,29	5	1,3	15	23	41,4	72
2597	16,82	5	1,3	20	23	54,1	72
3852	21,19	5	1,3	20	23	54,1	72
4708	23,92	5	1,3	20	23	54,1	72
5593	26,35	5	1,3	20	23	54,1	72
6049	25,80	5	1,3	20	23	54,1	72
7076	28,34	5	1,3	20	23	54,1	72
7390	28,04	5	1,3	20	23	54,1	72
7504	28,29	5	1,3	20	23	54,1	72
8132	30,44	5	1,3	20	23	54,1	72
8674	30,45	5	1,3	20	23	54,1	72
9958	32,81	5	1,3	20	23	54,1	72
12755	36,74	5	1,3	20	23	54,1	72
14866	39,44	5	1,3	20	23	54,1	72
15865	40,41	5	1,3	20	23	54,1	72

Re	Nu / Pr ^{1/3}	s _r (mm)	δ _r (mm)	h _r (mm)	d _{kr} (mm)	s _t (mm)	s _t (mm)
18918	44,64	5	1,3	20	23	54,1	72
20430	47,33	5	1,3	20	23	54,1	72
24653	49,29	5	1,3	20	23	54,1	72
25110	49,56	5	1,3	20	23	54,1	72
30246	58,98	5	1,3	20	23	54,1	72
34240	56,49	5	1,3	20	23	54,1	72
34668	59,25	5	1,3	20	23	54,1	72
36808	62,31	5	1,3	20	23	54,1	72
45654	65,08	5	1,3	20	23	54,1	72
56354	74,21	5	1,3	20	23	54,1	72
56782	78,35	5	1,3	20	23	54,1	72
65913	86,11	5	1,3	20	23	54,1	72
69052	85,85	5	1,3	20	23	54,1	72
82177	98,03	5	1,3	20	23	54,1	72
84745	102,74	5	1,3	20	23	54,1	72
99297	108,87	5	1,3	20	23	54,1	72
102436	114,10	5	1,3	20	23	54,1	72
124692	127,97	5	1,3	20	23	54,1	72
4400	46,11	8	1,3	10	23	27,6	69
5133	49,28	8	1,3	10	23	27,6	69
6205	55,45	8	1,3	10	23	27,6	69
7559	65,90	8	1,3	10	23	27,6	69

Re	Nu / Pr^{1/3}	s_r (mm)	δ_r (mm)	h_r (mm)	d_{kr} (mm)	s_t (mm)	s_t (mm)
8913	72,94	8	1,3	10	23	27,6	69
9872	75,77	8	1,3	10	23	27,6	69
11225	78,92	8	1,3	10	23	27,6	69
13200	87,63	8	1,3	10	23	27,6	69
13482	88,02	8	1,3	10	23	27,6	69
15005	95,46	8	1,3	10	23	27,6	69
18333	106,97	8	1,3	10	23	27,6	69
22733	117,15	8	1,3	10	23	27,6	69
24820	118,43	8	1,3	10	23	27,6	69
28430	127,76	8	1,3	10	23	27,6	69
34861	148,27	8	1,3	10	23	27,6	69
42025	161,74	8	1,3	10	23	27,6	69
49471	172,80	8	1,3	10	23	27,6	69
52799	181,75	8	1,3	10	23	27,6	69
60922	193,52	8	1,3	10	23	27,6	69
63911	205,44	8	1,3	10	23	27,6	69
73050	220,95	8	1,3	10	23	27,6	69
94203	274,00	8	1,3	10	23	27,6	69
97587	265,69	8	1,3	10	23	27,6	69
109997	279,13	8	1,3	10	23	27,6	69
119023	323,54	8	1,3	10	23	27,6	69
142715	360,08	8	1,3	10	23	27,6	69

Re	Nu / Pr^{1/3}	s_r (mm)	δ_r (mm)	h_r (mm)	d_{kr} (mm)	s_l (mm)	s_t (mm)
170919	388,65	8	1,3	10	23	27,6	69
181637	399,61	8	1,3	10	23	27,6	69
213790	447,23	8	1,3	10	23	27,6	69

10.3.4 P. W. Eckels and T. J. Rabas, "Heat transfer and pressure drop of typical air cooler finned tubes" *Transactions of the ASME*, vol. 107, pp. 198-204, 1985.

Re	Nu / Pr^{1/3}	s_r (mm)	δ_r (mm)	h_r (mm)	d_{kr} (mm)	s_t (mm)	s_t (mm)
431	8,63	2,31	0,38	15,87	26,87	55	63,5
661	10,03	2,31	0,38	15,87	26,87	55	63,5
738	10,70	2,31	0,38	15,87	26,87	55	63,5
930	11,57	2,31	0,38	15,87	26,87	55	63,5
1058	12,05	2,31	0,38	15,87	26,87	55	63,5
1127	12,45	2,31	0,38	15,87	26,87	55	63,5
1311	13,33	2,31	0,38	15,87	26,87	55	63,5
1400	13,90	2,31	0,38	15,87	26,87	55	63,5
1506	14,50	2,31	0,38	15,87	26,87	55	63,5
1625	15,40	2,31	0,38	15,87	26,87	55	63,5
1703	15,66	2,31	0,38	15,87	26,87	55	63,5

Биографија аутора

Милош Михаиловић је рођен 30.12.1980. године у Београду где је завршио основну школу и Пету београдску гимназију на природно-математичком смеру.

Машински факултет Универзитета у Београду уписао је 1999. године. Дипломски рад са темом „Експериментално одређивање брзине гаса у тачки инверзије фаза у колони DN 300 са испуном за систем ваздух - вода“ одбранио је 2008. године на смеру Процесна техника.

Након дипломирања запошљава се у предузећу за пројектовање и извођење термотехничких система „Славија пројект“ у којем током следећих пет година, као пројектант термотехничких система, учествује у изради бројне пројектне документације. У истом периоду у Инжењерској комори Србије полаже стручни испит за машинску струку – област термотехника, термоенергетика, процесна и гасна техника, и завршава курс за хидрауличко балансирање цевовода.

На Докторске студије на Машинском факултету Универзитета у Београду уписује се шолске 2013/14. године након запослења на Високој инжењерској школи струковних студија „Техникум Таурунум“ у Земуну.

Као пројектант сарадник на катедри за Процесну технику учествовао је у изради пројектне документације на неколико пројеката.

До сада као аутор и коаутор има више објављених радова и техничких решења.

Милош Михаиловић се служи програмским пакетом Microsoft Office (Word, Excel, Power Point), AutoCAD, MathCAD, Microsoft Visual Studio, Carrier's Hourly Analysis Program (HAP), TRANE Duct designer.

Одлично се користи енглеским језиком.

Изјава о ауторству

Име и презиме аутора: Милош Михаиловић
Број индекса: Д49/13

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом:

„Топлотне перформансе и пад притиска код цевног размењивача топлоте са завојним ребрима и троугластим распоредом цеви“

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

У Београду, 30.12.2019.

Потпис аутора

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора: Милош Михаиловић

Број индекса: Д49/13

Студијски програм: Процесна техника

Наслов рада: „Топлотне перформансе и пад притиска код цевног размењивача топлоте са завојним ребрима и троугластим распоредом цеви“

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

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао ради похрањивања у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

У Београду, 30.12.2019.

Потпис аутора

Изјава о коришћењу

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

„Топлотне перформансе и пад притиска код цевног размењивача топлоте са завојним ребрима и троугластим распоредом цеви“

која је моје ауторско дело.

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

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

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

(Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

У Београду, 30.12.2019.

Потпис аутора

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