

## РЕЦЕНЗИЯ

за дисертационен труд  
за придобиване на образователната и научна степен "Доктор" в

**Област на висше образование: 5. Технически науки**

**Професионално направление: 5.4. Енергетика**

**Специалност: „Промислена топлотехника“**

**Автор: маг. инж. Пламен Йорданов Бонев**

**Тема: „Интензификация на топлообмен чрез спирални пружини при течение на еднофазов поток в тръби при преходен режим“**

**Член на научното жури: проф. дн инж. Йордан Янков Христов**

### **1. Тема и актуалност на дисертационния труд**

Интензификация на топлообмена означава *повишаване на коефициентите на топлопредаване* чрез различни средства. Целта може да бъде намаляване на габаритите и масата на топлообменния апарат (ТА) или намаляване на температурния напор, в сравнение с тези при стандартните ТА с гладки повърхности.

Съществуват две основни направления в интензификацията на топлообмена. Първото е свързано с увеличаване на топлинния поток, независимо от допълнителните разходи на енергия, които са свързани с увеличената помпена мощност за пренасяне на топлоносителя.

Второто направление е свързано с увеличаване на топлинния поток при неизменна мощност за преодоляване на хидравличните съпротивления, т.е. с увеличаване на ефективността на топлопредаване.

Дисертацията е оформена в **5 големи глави** и приложения към тях.

### **2. Обзор на цитираната литература**

Литературата, използвана за анализа на състоянието на проблема и анализа на получените резултати обхваща **149 източника**, публикувани в световно известни научни списания, което показва добро и адекватно познаване на проблема от страна на дисертанта и неговия ръководител.

Дисертацията, по-точно прегледът на възникващите задачи (в **Глава 1**) свързани с интензификацията на топлообмена и повишаване на ефективността на топлообменните апарати, представя адекватно съвременното състояние на проблема. Специално са изследвани публикуваните в литературата резултати, свързани с експериментални изследвания за интензификация на топлообмена, с помощта на винтови пружини при преходен режим на потока, които са твърде малко. Това позволява да се формулира областта на изследванията в дисертацията, именно: влиянието на височината на турбулизатора (диаметър на проводника на пружината) и стъпката, и режимните параметри върху възможностите за интензифициране на топлообмена;

Обръщам специално внимание на анализа направен в **Глава 1**, който разглежда критично състоянието на проблема развит в дисертацията и на тази база ясно са определени целите и задачите, а именно

### **3. Методика на изследване**

Научното изследване е проведено на многофункционален лабораторен опитен стенд за изследване на интензификация на топлообмена, при ламинарен, преходен и турбулентен режим на еднофазов воден поток в кръгла тръба, чрез използване на различни видове турбулизатори.

**ЦЕЛИ:** Определяне на областта от геометрични и режимни параметри, в която се постига максимално възможна термодинамична ефективност, при преходно течение на еднофазен поток в кръгла тръба, с поставени винтови пружини (с различни геометрични параметри): за широка област на реални операционни състояния (различни масови потоци и температури на вода като топлоносител).

#### **ЗАДАЧИ:**

**Да се изследва по опитен път интензификация на топлообмена, при преходен и турбулентен режим на еднофазен воден поток в кръгла тръба, чрез използване на винтови пружини с различни геометрични параметри, за постигане на максимално възможната термодинамична ефективност.**

Област за геометричните параметри:  $e / D_i = 0.063 - 0.077$ ,  $p / e = 6.7 - 15.5$ , и област на режимни параметри:  $Re = 10^3 - 10^4$  и  $Pr = 3.9 - 10.0$ . Да се определи границата, при която този ефект се изчерпва.

**Да се извърши оценка за термодинамичната ефективност и максималните и реалните печалби от използване на винтови пружини за интензификация на топлообмена в гладки тръби, за различни случаи от практически интерес.**

**Да се покаже практическата ползност от използването на тази техника за интензификация на топлообмена при създаването на по-ефективни кожухотръбни топлообменни апарати.**

**Направените акценти позволяват да се формулират правилно целите и задачите на дисертацията.**

**Глава 2** представя подробно опитната инсталация и използваните техники за изследване, които са адекватни на поставените цели и задачи. Използвани са съвременни измервателни уреди, а за програмиране на cDAQ системите е използван софтуера LABVIEW.

Използваните зависимости за обработка на експериментални данни са коректни и се основават, както на известни от литературата уравнения, така и на такива получени от ръководителя на дисертанта, през неговата дългогодишна практика в областта на интензификация на топлообмена.

В допълнително представена методика са описани подробно начините за пресмятане на косвено измерваните величини, които са целта на настоящото изследване. Физическите свойства на водата са представени в **Приложение А** към дисертацията. Определянето на грешките от пряко и косвено измерваните величини е представено в **Приложение В**.

**Глава 3** е посветена на проверка за достоверност (верификация) на получените опитни резултати. Експерименталната програма включва:

Експерименти за определяне на коефициентите на хидравлично съпротивление и топлопредаване за течение на воден поток в гладка тръба при ламинарен, преходен и турбулентен режим (при изотермични и неизотермични условия), при условия на загряващ се вътрешен поток.

Целта е да се търси възможен ефект, от преминаващият през стената на тръбата топлинен поток, върху стойността на коефициента на хидравлично съпротивление в развиващ се и напълно развит воден поток, при преход от ламинарен към турбулентен режим.

Получените резултати са от внимателна и продължителна верификация (проверка за достоверност на получените резултати) на опитната уредба, чрез двукратно проведени експерименти с гладка тръба, като база за сравнение. Коефициентите на хидравлично съпротивление на гладката тръба са определени при изотермични и неизотермични (едновременно с определяне на коефициентите на топлопредаване) условия.

Получените резултати са сравнени с достатъчен брой теоретични и експериментални зависимости, особено тези, които се отнасят до изследвания в преходния режим. Опитната уредба се характеризира със стабилно и надеждно действие, а получените резултати са с висока степен на достоверност и не будят съмнения.

#### **Глава 4** е посветена на **нови опитни резултати и техния анализ.**

Изследванията са провеждани в условията на противотоков ТА, което означава, че за всеки режим масовите потоци и входните температурни разлики между студения (вътрешен) и горещия (външен) воден поток (при гладка тръба и такава с пружина) се поддържат с еднакви стойности.

Поради тази причина, експериментите с гладка тръба са повторени с по-малки входни температурни разлики между горещия и студен топлоносител, за да отговарят на тези при експериментите с поставена пружина в гладка тръба.

Изследвани са 15 броя опитни образци на тръби с винтови пружини, с различни геометрични параметри,  $e/D_i$  (на три нива) и  $p/e$  (на пет нива). Основната цел е търсенето на оптимално  $p/e$  (за максимален ефект при интензификация на топлообмена). Резултатите са представени графично: за всяка стойност на отношението  $e/D_i$ , коефициентът на хидравлично съпротивление и числото на Нуселт са представени като функции на числото на Рейнолдс ( $f_a = f(Re, p/e)$ ,  $Nu_a = f(Re, Pr, p/e)$ ), при  $Pr$  и  $p/e$  като параметри. Установено е, че съществува критично число на Рейнолдс,  $Re_{cr,2}$ , което е граница между преходът на течението от напълно развит ламинарен поток към напълно развит турбулентен поток (който приключва при  $Re \approx 3 \times 10^3$ ).

#### **Няколко извода могат да се направят от така получените резултати:**

(i) При използване на пружинни турбулизатори се наблюдават по-високи коефициенти на хидравлично съпротивление,  $f_a$ , както за ламинарен, така и за турбулентен поток, в сравнение със стойностите на този за гладката тръба,  $f_s$ ;

(ii) Преходът от ламинарен към турбулентен режим се появява по-рано, в сравнение с този при гладката тръба;

(iii) Наблюдава се „втори преход“ в областта  $3 \times 10^3 < Re < 10^4$ . По-ранният преход се обяснява с наличието на „пристенен“ турбулизатор.

## ГЛАВА 5 е посветена на оценки за ефективност и получени ползи

Разгледани са и са оценени ползите, които могат да се получат, при използване на винтова пружина с кръгло напречно сечение, поставена в кръгла тръба (за интензификация на топлообмена при течение на еднофазен поток в преходен и начален турбулентен режим) в зависимост от изследваните ѝ геометрични параметри.

Използвани са критерии на основата на Първи и Втори закон на термодинамиката, за някои от целите, определени в **Глава 1**. Разгледани са три случая, когато целта е повишаване на топлинния поток (топлинната мощност) на топлообменния апарат (ТА), а именно:

**Случай FG-1a.** При този случай, целта е да се оцени до колко може да се повиши топлинната мощност на ТА,  $Q_* > 1$ , или общата топлинна проводимост  $(UA)_* > 1$ , както и дали е налице по-ниско ниво на генерираната ентропия,  $N_{s,a} < 1$ . Наложените ограничения са: неизменен масов поток през апарата,  $W_* = 1$ , и скорост в тръбите,  $G_* = 1$ ,  $Re_a = Re_s$ .

Това е случай, когато конструкцията на апарата не се променя (диаметърът, броят на тръбите и дължината им са запазени, т.е.  $D_* = 1$ ,  $N_* = 1$ , и  $L_* = 1$ ). В резултат, помпената мощност за преодоляване на хидравличните съпротивления нараства,  $P_* > 1$ , тъй като хидравличното съпротивление на тръба със спирална пружина нараства.

**Случай FG-2a.** При този случай, целта и ограниченията за геометрията са същите, както и при случая **FG-1a**, но е добавено и ограничение по отношение на помпената мощност  $P_* = 1$ . Тъй  $N_* = L_* = 1$ , масовият поток в ТА трябва да се намали ( $W_* < 1$ ) за да се удовлетвори изискването  $P_* = 1$ .

**Случай VG-2a.** Случаят **VG-2a** си поставя за цел да оцени повишеният топлинен поток,  $Q_* > 1$ , при ограничения за неизменни топлообменна площ ( $A_* = 1$ ) и помпена мощност ( $P_* = 1$ ). Случаят е подобен на **FG-2a**, където ТА оперира при намален масов поток, ( $W_* < 1$ ), а това понижава термодинамичната ефективност на ТА. Този ефект може да се избегне при ситуацията на **VG-2a**, като през ТА се поддържа неизменен масов поток, ( $W_* = 1$ ).

## 4. Приноси на дисертационния труд

**Съгласен съм с така декларираните приноси на дисертацията.**

Декларираните приноси на дисертационния труд се определят като **научно-приложни** и са както следва:

1. Проведени са оригинални експериментални изследвания в противотоков ТА с цел интензификация на топлообмена, с използване на винтови пружини поставени в гладка тръба: в преходен и напълно развит турбулентен поток на еднофазен воден поток;

2. Получени са корелационни зависимости за коефициента на хидравлично съпротивление  $f_a$ , в зависимост от геометричните параметри на тръбата и турбулизатора ( $e/D_i$ ,  $p/e$ ) и числото на Рейнолдс  $Re$ ;

3. Получени са корелационни зависимости за определяне на числото на Нуселт  $Nu_a$ , в зависимост от геометричните параметри ( $e/D_i$ ,  $p/e$ ), и числата на Рейнолдс и Нуселт.

4. Направен е критичен анализ на широко прилагани в научните изследвания критерии за оценка на ползите от използването на конкретна техника за интензификация на топлообмена, където в много случаи резултатите, най-често са завишени и некоректни;

5. Направени са реални оценки на възможните ползи, при  $Q_* > 1$ , както максимални, така и реални, които могат да се получат за действащ кожухотръбен ТА (при фиксирана геометрия), както и с нов топлообменен апарат (с променена геометрия), при еднакви наложени ограничения;

6. Показано е, че при интензификация на топлообмена в ТА, работният режим на топлоносителя трябва да бъде в преходната област (преход от ламинарен към турбулентен режим на потока в тръбите).

## **5. Публикации и цитирания на публикации по дисертационния труд**

Част от резултатите са публикувани в: **1 публикация в списание с импакт фактор, 2 публикации в международни реферирани списания и 4 публикации в местни технически издания.**

### **А. Публикации в чужбина**

#### **A1. Публикации в списания с импакт фактор (IF Scopus)**

1. Zimparov, V.D., **Bonev, P.J.**, Petkov, V.M., Benefits from the Use of Enhanced Heat Transfer Surfaces in Heat Exchanger. Design: A Critical Review, *J. Enhanced Heat Transfer*, 2016, 23(5), 371–391. (IF: 0.562)

#### **A2. Публикации в реферирани списания**

2. Zimparov, V.D., **Bonev, P.J.**, Petkov, V.M., Transitional Heat Transfer and Pressure Drop in Plain Horizontal Tubes - Revised Study, *Int. Rev. Chem. Eng.*, 9 (1) 2017, 1-7.

3. Zimparov, V.D., **Bonev, P.J.**, Petkov, V.M., Transitional Heat Transfer and Pressure Drop in Plain Horizontal Tubes, *Int. Rev. Chem. Eng.*, 2015, 7(2), 37-44.

### **Б. Публикации в страната**

4. **Bonev P.J.**, Petkov V.M., Performance Evaluation of Wire Coil Inserts in Turbulent Tube Flow – Critical Review, *J. Tech. Univ. Gabrovo*, vol. 53, 2016, 27-34.

5. **Bonev P.J.**, Petkov V.M., Heat Transfer Enhancement in Single-Phase Transitional Flow by Wire-Coil Inserts, *Thermal Eng.*, 2017, VIII (1) 61-65 (Publ. Tech. Univ. Varna)

6. **Bonev P.J.**, Heat Transfer Enhancement in Single-Phase Transitional Flow by Wire-Coil Inserts. Part 2: Performance Evaluation, *Thermal Eng.*, 2017, VIII (1) 47-51 (Publ. Tech. Univ. Varna)

7. **Bonev P.J.**, Heat Transfer Enhancement in Single-Phase Transitional Flow by Wire-Coil Inserts. Part 1: Friction Factor and Heat Transfer Coefficient, *Thermal Eng.*, 2017, VIII (1) 41-46 (Publ. Tech. Univ. Varna).

#### **В. Забелязани цитирания**

Zimparov, V.D., **Bonev, P.J.**, Petkov, V.M., Transitional Heat Transfer and Pressure Drop in Plain Horizontal Tubes - Revised Study, *Int. Rev. Chem. Eng.*, 9 (1) 2017, 1-7.

#### **Цитирана в:**

Tie Wei, Heat transfer regimes in fully developed plane-channel flows, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 131 (2019) 140-149.

#### **6. Авторство на получените резултати**

Получените резултати от научното изследване и представения дисертационен труд са личен принос на докторанта.

#### **7. Автореферат и авторска справка**

Авторефератът и авторската справка са изпълнени съгласно изискванията на ППНСАД при ТУ-Габрово.

#### **8. Забележки по дисертационния труд**

Забележки по същество по представения труд нямам.

#### **9. Заключение**

Считам, че представеният дисертационен труд **отговаря** на изискванията на Закона за развитие на академичния състав в Република България. Минималните изисквания на ЗРАСРБ, ППЗРАСРБ и ППНСАД при ТУ-Габрово за придобиване на научната и образователна степен „ДОКТОР” са изпълнени. Постигнатите резултати ми дават основание да предложа да бъде придобита образователната и научна степен „Доктор” от **маг. инж. Пламен Йорданов Бонев**, в

Област на висше образование - 5. Технически науки  
Професионално направление - 5.4. Енергетика ,  
Специалност - „Промислена топлотехника” .

26.01.2019 г.

Рецензент

/проф. дн инж. Й. Христов/

Подпис:

/ /