



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ

Инженерно - педагогически факултет - Сливен

Катедра „Механика, машиностроене и топлотехника“

маг. инж. Константин Василев Костов

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА ВЪЗМОЖНОСТИТЕ ЗА
ИНТЕНЗИФИЦИРАНЕ НА СЛОЖЕН ТОПЛООБМЕН В УСЛОВИЯ
НА СО-ГЕНЕРАТОР НА БАЗА ДВГ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

**на дисертация за придобиване на образователна и научна степен
"ДОКТОР"**

Област: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.4 Енергетика

Научна специалност: Теоретична топлотехника

Научен ръководител: проф. д-р инж. Петър Стефанов Костов

СЛИВЕН, 2019 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра „Механика, машиностроене и топлотехника“ към Инженерно – педагогически факултет - Сливен на ТУ-София на редовно заседание, проведено на 28.06.2019 г..

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 29.10.2019г. от 15:00 часа в зала 1207 на Инженерно – педагогически факултет - Сливен на Технически университет – София на открито заседание на научното жури, определено със заповед № ОЖ–5.4–15/15.07.2019г. на Ректора на ТУ-София в състав:

1. Проф. д-р инж. Петър Стефанов Костов – председател
2. Доц. д-р инж. Невен Йорданов Кръстев – научен секретар
3. Проф. д-тн. инж. Иван Славейков Антонов
4. Проф. д-р инж. Минчо Стоянов Минчев
5. Доц. д-р инж. Ангел Гаврилов Емануилов

Рецензенти:

1. Проф. д-тн. инж. Иван Славейков Антонов
2. Доц. д-р инж. Невен Йорданов Кръстев

Материалите по защитата са на разположение на интересувашите се в Учебен отдел на Инженерно - педагогически факултет – Сливен на ТУ-София.

Дисертантът е задочен докторант към катедра „Механика, машиностроене и топлотехника“ на Инженерно - педагогически факултет - Сливен. Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора, като някои от тях са подкрепени от научноизследователски проекти.

Автор: маг. инж. Константин Василев Костов

Заглавие: Експериментално изследване на възможностите за интензифициране на сложен топлообмен в условия на Со-генератор на база ДВГ

Тираж: 30 броя

Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Ефективното преобразуване и използване на енергията е национален приоритет в областта на енергетиката и се разглежда като фундаментална предпоставка за изпълнението на националните цели за значителен и устойчив икономически растеж. Ефективното функциониране на енергетиката е от жизнено значение за всяка икономика. Като директен резултат от повишаването на енергийната ефективност може да се намалят разходите за първични енергоизточници, да се намали замърсяването на околната среда и да се използват в по-малка степен ограничените и жизненоважни ресурси на нашата планета.

В България все повече се осъзнава, че комбинираният добив на топлинна и електрическа енергия принадлежи към високите технологии в енергетиката и позволява съществено да се повиши енергийната ефективност, като се осигурява по-висока надеждност и непрекъсваемост на снабдяването с енергия. Независимо, че ефективното използване на енергията е важна национална стратегия, енергийната ефективност все още не се е превърнала в такъв приоритет на националната икономика. Повишаването на енергийната ефективност изисква комплексно решаване на съвкупност от технически, икономически и организационни задачи при минимизация на разходите, направени за постигане на тази цел.

Състоянието на енергийния пазар и оскъдните местни енергоизточници ни принуждават както в близка, така и в средносрочна перспектива, при удовлетворяване на потребностите от енергия преобладаващо да използваме конвенционалните енергоносители - нефт, природен газ и въглища, като се стремим към максимална ефективност при добива на електрическа и топлинна енергия. Едно добро решение в това направление е използването на технологията на децентрализираното им производство, чрез внедряване на локални когенерационни инсталации. От своя страна общата енергийна ефективност на използване на горивото, за една когенерационна система, може да повиши чрез увеличаване на добитото количество полезна топлинна енергия.

В тази връзка е направено проучване и са извършени експериментални изследвания относно възможностите за интензифицирането на топлообмена в топлообменната апаратура на когенератор на база ДВГ.

Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване

Основната цел на дисертационния труд е експериментално да се изследват възможностите за интензифициране на топлообмена в условия на когенератор на база двигател с вътрешно горене.

За постигането на целта залегнала в дисертационния труд, се предвижда да бъдат извършени следните задачи:

- Проучване на възможностите за внедряване на когенерация на база ДВГ на различни предприятия консумиращи електро и топлинна енергия и анализиране работата на промишлен когенератор;
- Проектиране и изграждане на лабораторен стенд на когенератор на базата на ДВГ, с цел съставяне на топлинен баланс при различни режими. Анализиране работата на топлообменния апарат „продукти на горене – вода“ с цел да се предложат мерки за интензифицирането на топлообмена;
- Използвайки принципите на теорията на подобие да бъде материализиран физически модел на една тръба от топлообменния апарат „продукти на горене – вода“ и да се изследват различни конструктивни и режимни параметри целящи интензифицирането на топлообмена между газова среда и твърдо тяло;
- Обработване на експерименталните резултати във вид на критериални зависимости – със и без интензификация на топлообмена;
- Сравняване на получените резултати и даване на оценка за хидравличните загуби;
- Даване на принципно предложение за топлообменен апарат за утилизирание на топлината на когенератор на база ДВГ.

Научна новост

Получени са балансови характеристики, при работа на лабораторен когенератор в променлив режим. Експериментално е изследван конвективния топлообмен в система „продукти на горене – тръба“ в условия близки до характеристиките на когенератор. Получени са критериални уравнения от вида $Nu=f(Re)$ за гладка тръба и при наличие на интензификатори на топлообмена

Практическа приложимост

Реализирано е приложение на различни интензификатори, за интензифициране на топлообмена между газова среда и твърдо тяло. Доказано е, че използването на интензифициращи елементи, поставени на пътя на газовия поток, са приложими за кожухотръбни топлообменни апарати, използвани за утилизация на топлина при когенерация на база ДВГ.

Изследваните конструкции на интензификаторите биха могли да послужат за основа на следващи серии експериментални изследвания, с цел по – задълбочено разглеждане на факторите влияещи върху интензивността на топлопредаването.

Апробация

Дисертационният труд е докладван и обсъден на разширен катедрен съвет на катедра „Механика, машиностроене и топлотехника“ към Инженерно – педагогически факултет - Сливен на ТУ-София. Работата по дисертацията е докладвана на:

- Националната конференция с международно участие “Технически системи и технологии 2007“ – гр. Сливен;
- Научна конференция с международно участие „Техника, технологии и образование – 2007” – гр. Ямбол;
- Национална конференция с международно участие “Механизми, машинна механика, машиностроителни и енергийни технологии – 2009” – м. Бакаджика, гр. Ямбол
- Национална конференция с международно участие „СЛИВЕН – 2014“
- Национална конференция с международно участие „СЛИВЕН – 2018“

Публикации

Основни постижения и резултати от дисертационния труд са публикувани в 6бр. научни статии в България, от които 1бр. самостоятелна и 5бр. в съавторство.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е в обем от **149** страници, като включва увод, **4** глави за решаване на формулираните основни задачи, списък на основните приноси, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература. Цитирани са общо **177** литературни източници, като **95** са на латиница и **73** на кирилица, а останалите са интернет адреси. Работата включва общо **66** фигури и **37** таблици. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРЕН ОБЗОР

В литературния обзор са разгледани системите за когенерация, тяхното приложение в различни сфери от промишлеността, енергетиката и икономиката, като инсталации позволяващи намаляването на себестойността на преобразуването на енергията. Извършено е сравнение относно инвестиционните и експлоатационни характеристики на когенерационни системи на база ДВГ и газова турбина.

Относно възможността за достигане на максимална топлинна ефективност на когенератор на база ДВГ изгарящ въглеводородно газово гориво, са разгледани възможностите за усвояване на топлина от системата. Обърнато е внимание на видове топлообменни апарати, намери приложение, като утилизатори на топлина от системата. Анализирани са критериите за оценка ефикасността на топлообменниците.

Във връзка със създаването на високо ефективни и компактни топлообменни апарати, които обезпечават значителна икономия на енергоносители, е направено проучване относно методите и средствата за интензификация на топлообмена между газова среда и твърдо тяло. Проучен е опита, постигнатите резултати и приложението на различни интензифициращи елементи, оказващи влияние върху нарастването на коефициента на топлопредаване и хидравличните загуби.

Разгледани са перспективните методи за интензифициране на топлообмена между газова среда и твърдо тяло, респективно между „продукти на горене – охлаждаща течност“ в кожухотръбен топлообменен апарат, като част от технологична верига за усвояване на топлината в система на когенератор на база ДВГ.

ГЛАВА 2. ПРИЛОЖЕНИЕ И ВЪЗМОЖНОСТИ ЗА КОГЕНЕРАЦИЯ НА БАЗА ДВГ В ПРОМИШЛЕНОСТТА НА ОБЛАСТ СЛИВЕН

2.1. Товарни графици на предприятия консумиращи топло- и електроенергия и възможности за внедряване на когенерация в тях

Технологията на когенерация, уверено намира приложение в световната енергетика, като в редица страни тя планомерно се стимулира и има конкретни планови показатели. Съгласно Европейската асоциация за когенерация в страни като Германия, Швеция, Англия, Белгия, Ирландия, Испания, Португалия и други се работи по национални програми, които предвиждат до 2020г. децентрализирания добив на топлинна и електрическа енергия да се удвои и надхвърли 40% в националния баланс на страната [70].

Анализът на структурата на енергопотреблението на двата вида енергия (топлинна и електрическа), динамиката на цените и географското разположение на фирмите в региона са предпоставка за провеждане на проучване относно възможностите за въвеждане на съвместен добив на

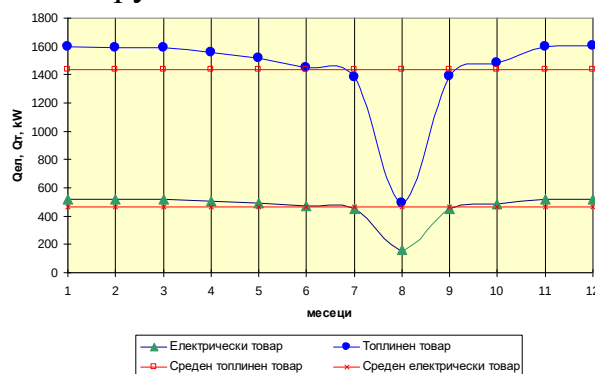
топло- и електроенергия на две търговски дружества в град Сливен – текстилна фирма „Декотекс“ АД – Сливен, и предприятие за тестени изделия – хлебозавод „Демеа Сливен ООД“.

Двете разгледани предприятия са с различен предмет на дейност и съответно с различна консумация на топло – и електроенергия, както средно денонощно, така и средно годишно.

На фиг.2.2. е представен товарния график на фирма „Декотекс АД“ относно потреблението на топлинна и електрическа енергия, изготвен въз основа на събрани данни от дружеството. От проведеното проучване относно енергопотреблението, се вижда, че фирмата има относително постоянна консумация както на електрическа, така и на топлинна енергия (с изключение на месец август). На годишна база средната консумация на електроенергия на месец е 475 kW, а на топлинна енергия – 1437 kW. Представено по този начин означава, че дружеството консумира около три пъти повече топлинна енергия.

За определяне на потенциала за внедряване на когенерация в дружеството, се изчислява отношението на средно годишното потребление на електроенергия към топлоенергия (E/T) [171].

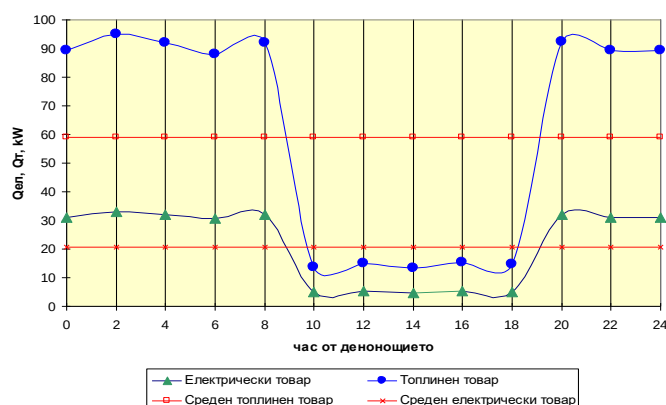
За фирма „Декотекс АД“ – Сливен отношението на средно годишното потребление на електроенергия към топлоенергия (E/T)=0,33, което е предпоставка за въвеждане в експлоатация на когенерация, тъй като предприятието има висок топлинен товар и инсталацията за комбиниран добив на топло- и електроенергия може да се избере за покриване на топлинния товар, а неизползваната електроенергия да се продава на местното енерго - разпределително дружество.



Фиг. 2.2. Товарен график на „Декотекс АД“ – Сливен

Предмета на дейност на второто предприятие е коренно различен, което обуславя проучването да се извърши не за период от една година, а за 24 часа. Фирма „Демеа Сливен ООД“ е с непрекъсваем цикъл на работа целогодишно и поради тази причина по-показателно да се проведе проучване в рамките на едно денонощие. Предоставените данни от фирмата са обработени и са показани графично на фиг.2.3. Данните са осреднени от извадка по един случаен ден за всеки месец от годината. От графиката ясно се вижда, че в периода 10⁰⁰-18⁰⁰ч, във фирмата се извършват подготвителни технологични мероприятия и има занижена консумация на енергия. В

основния технологичен период от 20⁰⁰-08⁰⁰ ч дяловете на консумираната електро - и топлоенергия значително се повишава.



Фиг. 2.3. Товарен график на „Демеа Сливен ООД“

Анализирайки графика за енергопотребление на дружеството се вижда, че средната консумация на топло – и електроенергия са съответно – 59,9kW и 20,4kW на денонощие. За разлика от фирма „Декотекс АД“ – Сливен, тук спадът на консумация на енергия е обусловен от технологичния процес на работа на предприятието. Намаляването на потреблението на топлоенергия е приблизително осем пъти за периода от 10⁰⁰-18⁰⁰ч, докато на електроенергия около шест пъти.

Разглеждайки двата периода на върхово потребление и този на минимално потребление отношението на потребната електроенергия към топлоенергия (E/T) е съответно:

- за периода 20⁰⁰-08⁰⁰ ч - (E/T)=0,34;
- за периода 10⁰⁰-18⁰⁰ ч - (E/T)=0,34.

Въпреки, че има цикличност в потреблението на топло – и електроенергия и за двата периода се запазва отношението на потребната електроенергия към топлоенергия. При (E/T) < 0,4 – фирма „Демеа Сливен ООД“ може да инвестира във внедряването на когенераторна инсталация, но за разлика от „Декотекс АД“ – Сливен, тук по правилно изглежда решението за пълно покриване на електрическия товар и частично на топлинния товар, поради невъзможността за усвояване на топлината в периоди на занижена консумация. При върхови натоварвания ще се използва наличният газов котел във фирмата.

Товарните графици на двете предприятия с чувствително различаващ се предмет на дейност, при които бе доказана ефикасността от прилагане на когенераторна технология показват променливо отношение на дяловете топло – и електроенергия, както и наличие на специфични преходни периоди, които трябва да се имат предвид, както при проектиране на топлообменна апаратура, така и при структуриране броя и единичната мощност на когенериращите модули. От друга страна добива едновременно на електрическа и топлинна енергия на място, намалява риска от смущения в електрическата мрежа и повишават надеждността ѝ.

Въвеждането на когенерация може да помогне на предприятията да спазят националните и международни задължения за намаляване на изхвърляните вредни емисии в атмосферата, изискванията за редукция на CO_2 , тъй като когенерационните системи и системите за възстановяване на отпадъчна енергия отговарят на стандартите за чиста енергия.

2.2. Анализ на работата на промишлена когенерационна инсталация

Обект на изследване е промишлена когенерационна инсталация на база ДВГ, която е част от градската пречиствателна станция за отпадни води (ГПСОВ) на гр.Сливен.

Инсталираната система за комбиниран добив на топло и електроенергия, за изгаряне на добития биогаз е на чешката фирма TEDOM серия Cento T160 SP. Когенераторите са два на брой всеки със максимална изходяща електрическа мощност 160 kW и максимална изходяща топлинна мощност 177kW [175].

Добитата електроенергия покрива част от нуждите на ГПСОВ – Сливен. При работата на газовите двигатели, топлина се усвоява от охладителната система на двигателя и от изгорелите при работата им газове, посредством кожухотръбни топлообменни апарати. Топлата вода, чрез циркулационни помпи, се подава към пластинчати топлообменни апарати към кръга на биореакторите за предварително подгравяне на постъпващите утайки и за поддържане на оптимална работна температура в тях. Има изградена и връзка за покриване на част от топлинния товар на сградите на площадката на ГПСОВ гр.Сливен.

За да се анализира работата на когенераторите и състави топлинен баланс са взети проби от добития биогаз, които са предоставени на сертифицирана независима лаборатория . Анализа на пробите е извършен от СЖС България ЕООД – Лабораторен Комплекс на територията на Лукойл Нефтохим АД Бургас. Получените данни за свойствата на биогаза са представени в таблица 2.8.

От получените данни от анализа на състава на биогаза, прави впечатление, че липсват други горими газове освен метана и водорода, като количеството на CH_4 е 63,3%, а на H_2 под 0,1%. Тези получени данни от хроматографския анализ за състава на биогаз се доближават до данни посочени от [83], [127], [163].

Ключов аспект за оценка на ефективността на когенерационните инсталации е определянето на общия коефициент на полезно действие на системата, който по същество представлява коефициент на използване на горивото.

Необходимите стойности на величините влизащи в топлинният баланс (температури, скорости, дебита на топлоносителите) са отчетени от измервателната апаратура на системата за управление на когенераторите.

Тъй като са проведени наблюдения в няколко не поредни дни (проби са вземани всеки понеделник, в продължение на месец), с цел работа при различни външни условия, получените стойности за к.п.д. на когенерационния модул варират в границите от $\eta=0,47\div 0,64$

Таблица 2.8.

SGS	Лабораторен комплекс СЖС България Лаборатория за нефтопродукти, газове и химикали OGC Lab			
ПРОТОКОЛ №63				Дата: 27.01.2014г.
Продукт – въглеводороден газ Заявител на изпитването: ИПФ-Сливен, ТУ-София, номинация №74/27.01.2014 KZL1430-0001				Дата на получаване: 27.01.2014г. 12:30 ч.
	Показатели	Единица	Тест метод	Резултати от анализа
1.	Хроматографски анализ			
	кислород, O ₂	%(v/v)	ФМ 1-13	1,4
	азот, N ₂	%(v/v)		3,1
	въглероден оксид, CO	%(v/v)		<0,1
	метан, CH ₄	%(v/v)	ФМ 1-12	63,3
	въглероден диоксид, CO ₂	%(v/v)		32,2
2.	Водород, H ₂	%(v/v)	ФМ 2-04	<0,1

Въз основа на проведеното проучване е анализирана работата на действащата пречиствателна станция за отпадни води на гр. Сливен. От съставения топлинен баланс прави впечатление ниския коефициент на полезно действие на когенерационните модули, поради което трябва да се търсят начини за повишаването му, като основно трябва да се обърне внимание на повишаване на дела на добиваната топлинна енергия, чрез интензифициране на топлообмена.

Разгледаните в тази глава две промишлени предприятия доказват, че внедряването на високоефективен комбиниран добив на енергия, предлага значителен потенциал за енергийни спестявания, а проведеното проучване на въведена в експлоатация когенерационна инсталация необходимостта от усъвършенстване на топлообменната апаратура.

ГЛАВА 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЕН СТЕНД НА КОГЕНЕРАЦИОННА ИНСТАЛАЦИЯ ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ НА ВЪЗМОЖНОСТИТЕ ЗА ИНТЕНЗИФИЦИРАНЕ НА ТОПЛООБМЕНА

3.1. Експериментална уредба

Комплексното изследване на добива на топло и електроенергия, при когенерация и възможностите за интензифициране на топлообмена в топлообменната апаратура се проведе на ново създадена инсталация за целите на настоящата дисертация. Общият вид е показан на фиг.3.2.

3.1.1. Основни характеристики на инсталацията

Въз основа на проведеното литературно проучване е създаден лабораторен стенд на когенератор на база ДВГ. Инсталацията се състои от следните агрегати и елементи:

- двигател с вътрешно горене с номинална мощност 45,6 kW преустроен за работа с газово гориво;
- секционен топлообменен апарат за усвояване на топлината от двигателя;
- кожухотръбен топлообменен апарат за утилизиране на топлината от продуктите на горене на двигателя;
- постояннотокова, реверсивна, махална електрическа спирачка (пендел);
- тръбни и електрически връзки;
- система за управление.

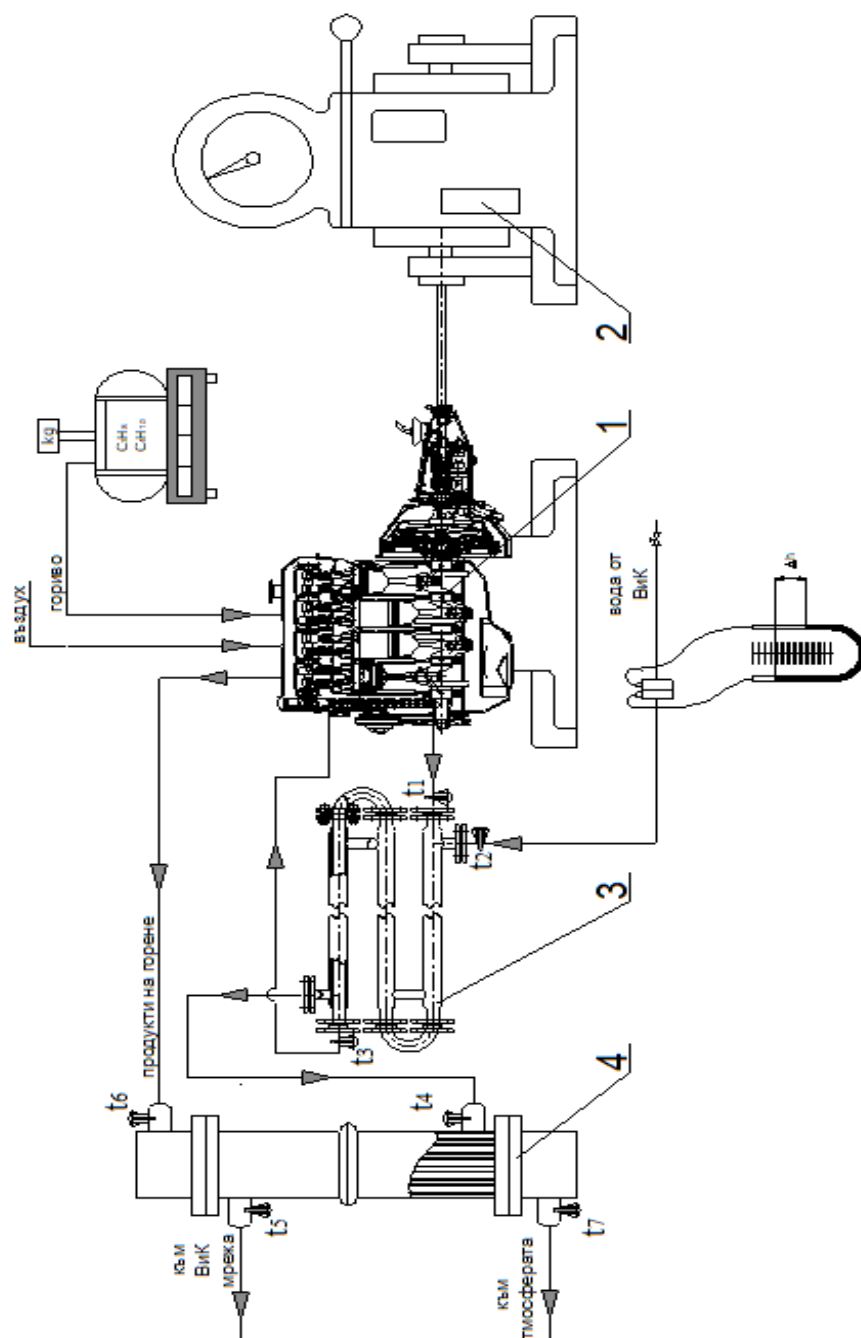
Стационарният двигател куплиран със съединителя и скоростната кутия (1) е закрепен върху солиден фундамент, поставен на еластични елементи. Роторът на спирачката (2) е свързан с вала на скоростната кутия и лагерува в статора. Статора от своя страна също е поставен на лагери на стойки и може да се завърта около оста си. Спирачният съпротивителен момент, който се поражда между статора и ротора от електрическите сили и е равен на въртящия момент на двигателя, се уравновесява със свързаната със статора везна.

Използването на постояннотокова, реверсивна, махална електрическа спирачка, позволява точно отчитане на мощността на двигателя при различно натоварване при съблюдаване синхронна честота на въртене $n=3000 \text{ min}^{-1}$.

По този начин отпада необходимостта от електрически генератор и трудностите със създаване и поддържане на постоянен товар по време на провежданите експерименти.

За гориво на двигателя ще се използва втечнен газ пропан-бутан. Измерването на потребеното на количество газ, при работа на инсталацията, се осъществява по тегловен метод с помощта на електронна везна, върху която е поставена бутилката за газа.

Към инсталацията са проектирани и инсталирани два топлообменни апарата, които позволяват съответно оползотворяване на топлината от двигателя с вътрешно горене и топлината на продуктите на горене. Първият топлообменен апарат отнема топлината от охладителната система на двигателя, като работните флуиди са вода и разтвор на етилен гликол. Във втория топлообменен апарат става преминаването на топлината от изгорелите газове на двигателя към течния топлоносител (водата), който идва от предходния топлообменник.



фиг.3.2. Общ вид на експерименталната уредба

1. Стационарен ДВГ – 45,6kW, 2. Постояннотокова, реверсивна, махална електрическа спирачка, 3. Три секционен ТА, 4. ТА – кожухотрѣбен „продукти на горене – вода“

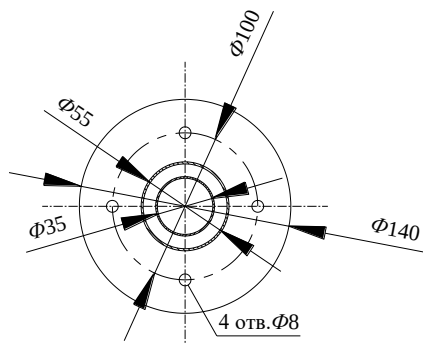
3.1.2. Проектиране на топлообменната апаратура

3.1.2.1. Теплообменен апарат за усвояване на топлината от охладителната система на двигателя с вътрешно горене

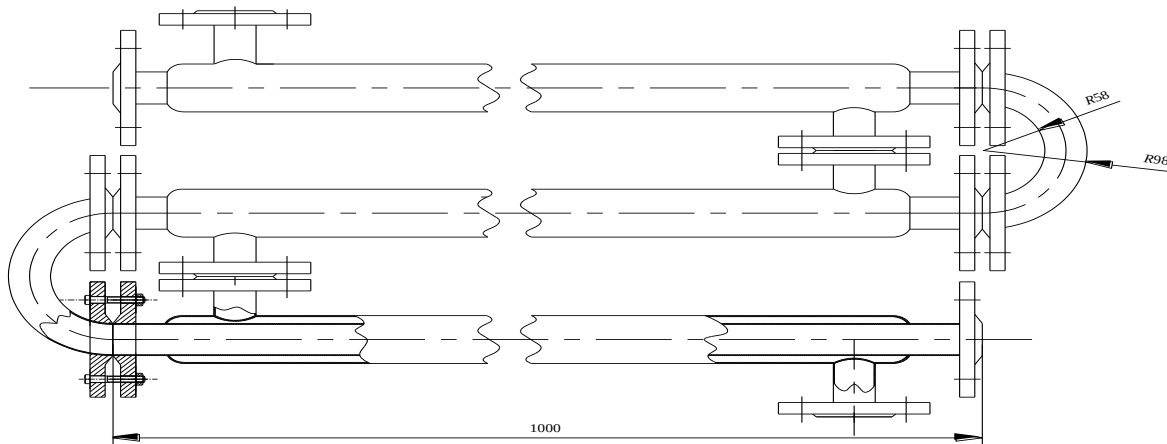
За усвояване на топлината от двигателя е проектиран секционен топлообменен апарат, който е присъединен към охладителната система на

двигателя. Избора на такъв тип топлообменен апарат е мотивирано от компактната и лесна за изработка конструкция от стандартни елементи, съизмеримата скорост на движение на флуидите и ниското хидравлично съпротивление [125], [153]. Избрана е схема на движение на флуидите в противоток.

На фиг.3.4. е показан напречен разрез на едната секция, а на фиг. 3.5 схема на топлообменника.



фиг.3.4. Напречен разрез на една секция на проектирания топлообменен апарат



фиг.3.5. Схема на проектирания три секционен топлообменен апарат

След проведените изчисления е определена топлинната мощност на топлообменния апарат $Q_{TA1}=22,42kW$, необходимия дебит на охлаждащата вода от ВиК мрежата $G_{TA1,c}=0,31kg/s$, неговите размери, хидравличните съпротивления и той е монтиран на стенда. Проектиран с три секционен топлообменен апарат тип „тръба в тръба“, с дължина $l=1000mm$ на всяка секция и съответно вътрешни диаметри на тръбите $d=35mm$, $D=55mm$.

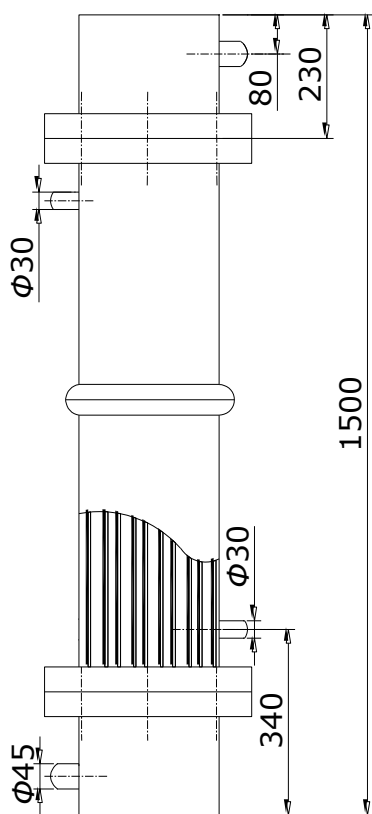
3.1.2.2. Теплообменен апарат „продукти на горене - течност“

При проектирането на втория топлообменен апарат „продукти на горене – течност“ е избрана конструкция на кожухотръбен топлообменен апарат. Движението на флуидите ще се извършва в противоток. Продуктите на горене ще се движат в тръбния сноп, а подгряваната вода в междутръбното пространство с цел намаляване на топлинните загуби на апарата. За компенсиране на голямата температурна разлика между изгорелите газове от двигателя и течния топлоносител е предвиден лещов компенсатор.

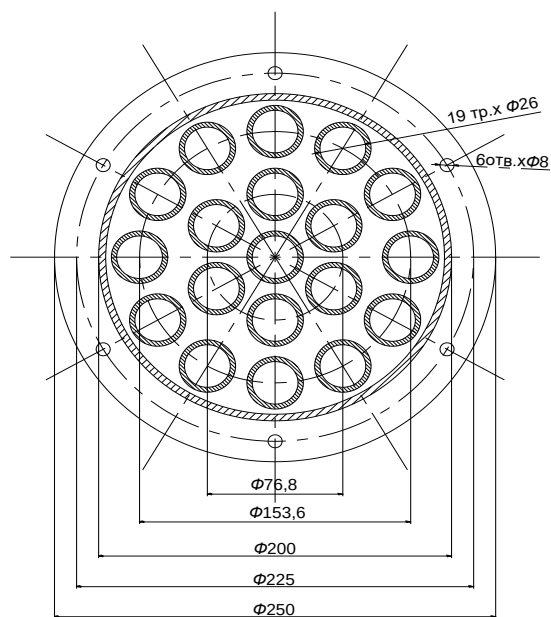
След проведените изчисления е определена мощността на топлообменния апарат $Q_{TA2}=13,5kW$ и неговите габаритни размери – фиг.3.7. Конструкцията е кожухотръбна с 19 броя тръбички с вътрешен диаметър $d_{втр.}=0,026m$, разположени по концентрични окръжности – фиг. 3.6.

3.2. Работа на инсталацията и методика на провеждане на експериментите

На представената на фиг.3.2. експерименталната уредба на създадения когенератор на база ДВГ, са проведени балансови изпитания. Проведени са две серии опити. При първата серия опити двигателя е максимално натоварен, като е променян дебита на водата преминаваща през топлообменните апарати. Втората серия опити е при постоянен дебит на водата, но при намаляване на натоварването съответно с 20% и 40%.



фиг.3.7. Схема на проектираният топлообменния апарат „продукти на горене – течност“



фиг.3.6. Схема на разположение на тръбите в топлообменния апарат „продукти на горене – течност“

3.3. Резултати получени при проведените експериментални изследвания.

Топлинния баланс на лабораторния стенд на когенератора е равен на:

$$Q_{\text{общо}} = Q_{\text{ел.}} + Q_{\text{охл.}} + Q_{\text{дг.}} + Q_{\text{заг.}}, [\text{kW}] \quad (4.3)$$

където:

- $Q_{\text{общо}}$ – внесеното количество топлина за единица време с гориво-въздушната смес;

- $Q_{\text{ел.}}$ - отчетената от спирачката електрическа мощност;
- $Q_{\text{охл.}}$ - количество топлина на охладителната система на двигателя с вътрешно горене;
- $Q_{\text{дг.}}$ - количество топлина получено от изходящите газове на двигателя с вътрешно горене;
- $Q_{\text{заг.}}$ - загуби в когенератора.

Снетите стойности на величините участващи в съставянето на топлинния баланс на лабораторния когенератор, при първата серия опити са обработени и получените балансови резултати са представени в таблица 3.3.

Таблица 3.3.

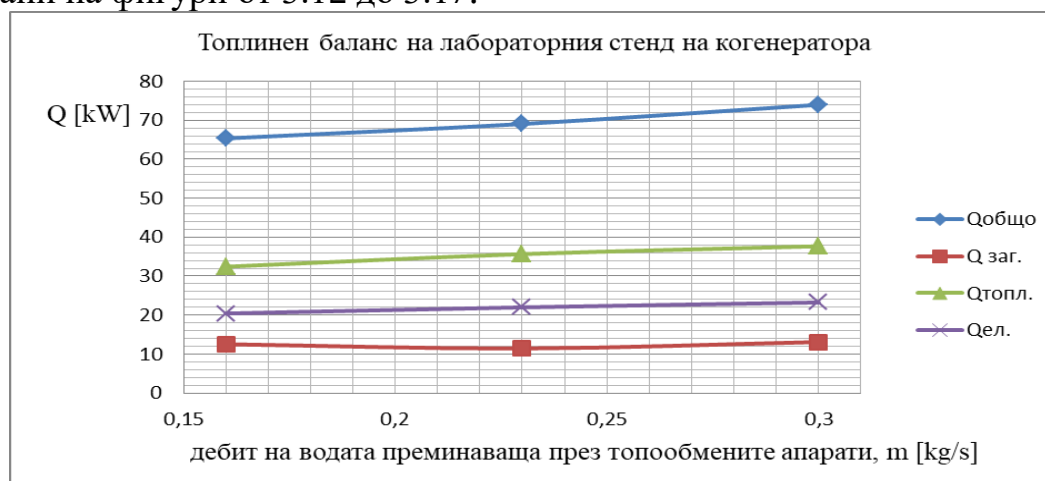
	$Q_{\text{общо}}$	$Q_{\text{охл.}}$	$Q_{\text{дг.}}$	$Q_{\text{заг.}}$		$Q_{\text{Т}}$		$Q_{\text{ел.}}$		$Q_{\text{Т}}/Q_{\text{ел}}$
	KW	KW	KW	KW	%	KW	%	KW	%	
I	65,38	20,06	12,38	12,52	19,14	32,44	49,62	20,42	31,23	1,59
II	69,08	21,20	14,46	11,43	16,55	35,66	51,62	21,99	31,83	1,62
III	74,01	22,60	15,09	13,08	17,67	37,68	50,91	23,25	31,41	1,62

Получените балансови резултати при намаляване на натоварването съответно с 20% и 40% са представени в таблица 3.5.

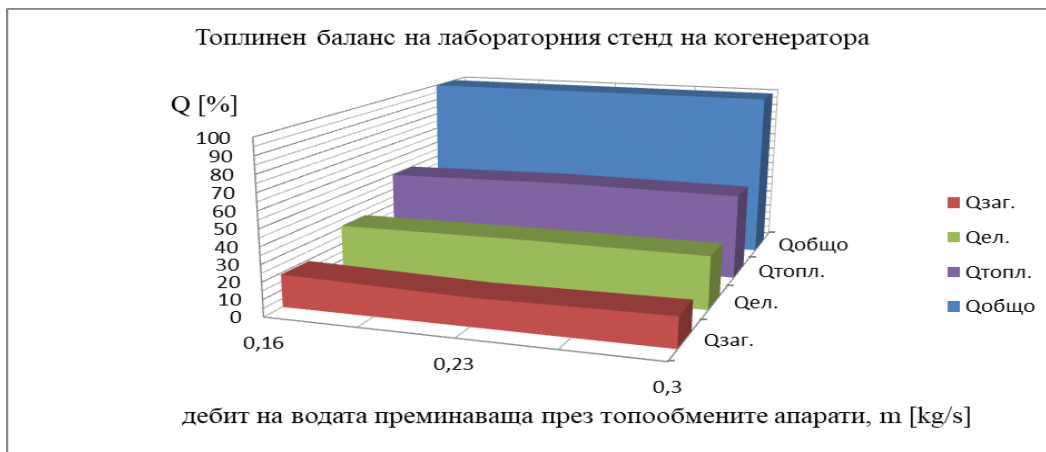
Таблица 3.5.

	натоварване	$Q_{\text{общо}}$	$Q_{\text{охл.}}$	$Q_{\text{дг.}}$	$Q_{\text{заг.}}$		$Q_{\text{Т}}$		$Q_{\text{ел.}}$		$Q_{\text{Е}}/Q_{\text{Т}}$
	%	KW	KW	KW	KW	%	KW	%	KW	%	
I	60	42,19	9,1	6,07	13,82	32,76	15,17	35,96	13,20	31,28	0,87
II	80	56,25	15,24	9,53	13,89	24,7	24,77	44,04	17,59	31,27	0,71
III	100	69,08	21,20	14,46	11,43	16,55	35,66	51,62	21,99	31,83	0,62

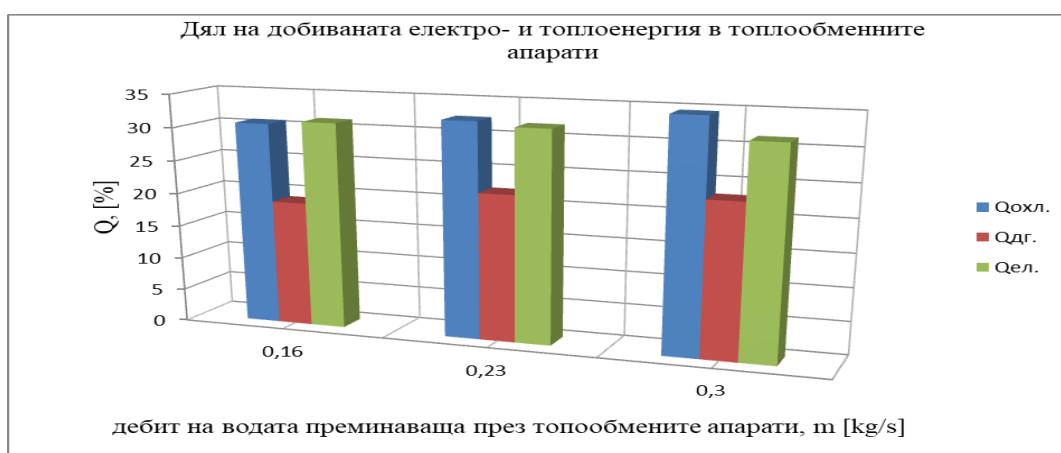
След обработка на експерименталните данни са построени зависимости показани на фигури от 3.12 до 3.17.



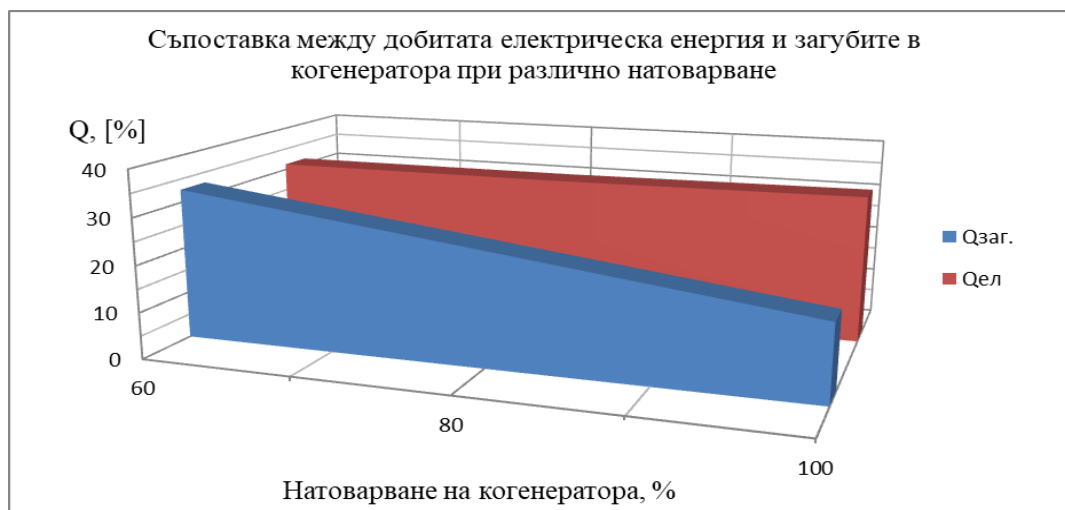
фиг.3.12. Топлинен баланс на когенератора в зависимост от дебита на водата преминаваща през топлообменните апарати



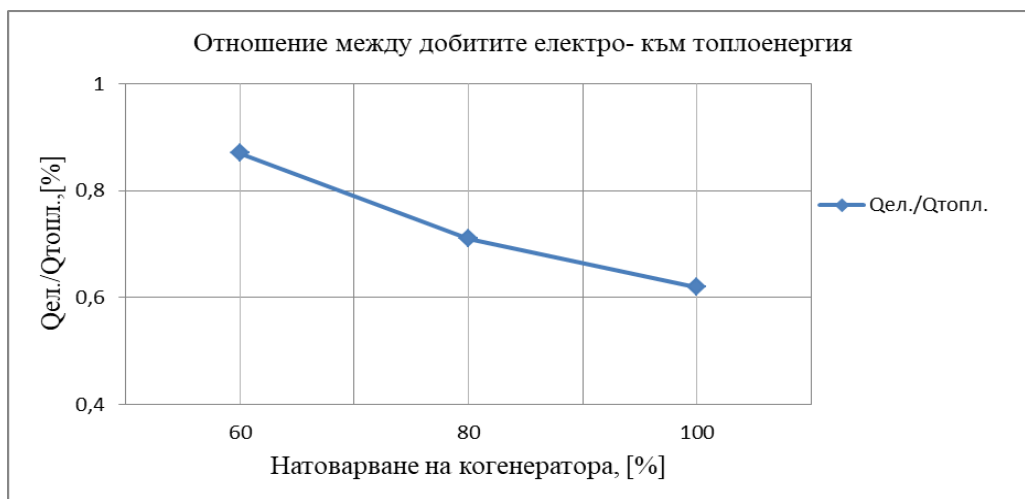
фиг.3.13. Процентно отношение на добитите електро- и топлоенергия и загубите в когенератора в зависимост от дебита на водата преминаваща през топлообменните апарати



фиг.3.14. Процентно отношение на добитите електро- и топлоенергия в двата топлообменни апарата на когенератора в зависимост от дебита на водата преминаваща през топлообменните апарати



фиг.3.16. Съпоставка на между добитата електроенергия и загубите в когенератора при намаляване на натоварването с 20% и 40%



фиг.3.17. Отношение на добитата електрическа към топлоенергия на когенератора при намаляване на натоварването с 20% и 40%

3.4. Анализ на получените резултати.

От получените резултати могат да се направят следните заключения:

- Общите загуби (разликата между внесеното количество енергия с горивото и добитите топло- и електро енергия) на когенератора са от порядъка на 17-19%;
- Отношението на добитата топлинна към електроенергия е около 1,6 пъти;

Получените резултати показват, че с намаляване натоварването на двигателя съотношението „добита електрическа енергия – топлина” се увеличава. Това се дължи преди всичко намаления дебит на продукти на горене в топлообменния апарат газ-вода и с намаляващия коефициент на топлопредаване от страната на газа.

Загубите имат комплексен характер и трябва да се анализират възможностите за повишаване на общия КПД на инсталацията.

Използване на конструктивните възможности за повишаване термичния КПД на двигателя с вътрешно горене, е една от възможностите, чрез повишаване на ε - степента на компресия (сгъстяване).

По-високото термично КПД води до увеличаване на дела на $Q_{el.}$ за сметка на загубите, т.е. намаляване дела $Q_{заг.}$.

Усъвършенстване на топлообменната апаратура, е другата възможност за повишаване на общия КПД на инсталацията. Проведените експериментални изследвания, при номинален режим, дават основание, да се предприемат мерки за усъвършенстване на топлообменния апарат продукти на горене - течен топлоносител.

От технологична и икономическа гледна точка, най – приемливо изглежда да се приложат методи за въздействие върху структурата на течението, за намаляване дебелината на граничния слой. Това може да се постигне, чрез поставянето в канала на допълнителни стени и прегради или други лошо обтекаеми елементи.

ГЛАВА IV – ЛАБОРАТОРНА УРЕДБА ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ ВЪЗМОЖНОСТИТЕ ЗА ИНТЕНЗИФИЦИРАНЕ НА ТОПЛООБМЕНА МЕЖДУ ГАЗОВА СРЕДА И ТВЪРДО ТЯЛО

4.1. Въведение

Въз основа на получените експериментални данни в глава 3 и използвайки принципите на теорията на подобие е материализиран физически модел на една тръба от кожухотръбния топлообменен апарат „продукти на горене – охлаждаща течност“.

Главната особеност при експерименталното изследване на топлообмена, е че обобщеното представяне на получените резултати е прието да се дава във вид на безразмерни апроксимирани функции [16], [56], [59], [86]. В общия случай изследваните критериални зависимости имат нелинеен характер, но добре се описват във вид на степенна функция. Критерий за приложимост на степенната зависимост между числата на подобие е разполагането на всички точки около една права линия в логаритмична координатна система.

Всичко това определя спецификата при планиране и обработка на резултатите от експеримента.

Метода анализ на размерностите [47], [104], [114] е утвърден подход при обработката на експериментални резултати, получени при подобни изследвания изпълнявайки съответните критерии за сходство.

4.2. Експериментална инсталация за изследване на конвективния топлообмен между газова среда и твърдо тяло

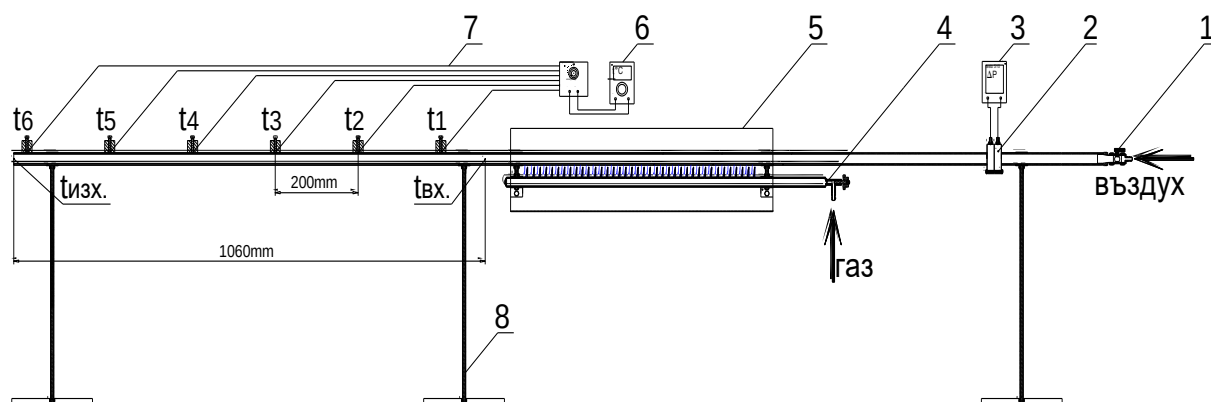
На фиг. 4.1 е показана подробна схема на стенда. Лабораторната уредба е разработена съгласно препоръките на [14], [107]. Уредбата се състои от стоманена безшевна тръба с $d_{втр.} = 20mm$, дебелина на стената $\delta = 2,5mm$ и дължина $l = 3000mm$, като измервателния участък е с дължина $l_{из} = 1060mm$. Вътрешният диаметър на тръбата е избран от условието:

$$Re_{та} = Re_{из} = idem, (4.1)$$

където: $Re_{та}$ е числото на Рейнолдс в една тръбичка от кожухотръбния топлообменен апарат “продукти на горене – вода”, а $Re_{из}$ е числото на Рейнолдс на измервателния участък.

Въздуха преминаващ през тръбата ще се подава от компресорна станция, чийто избор е обоснован от възможността да се имитират подобни условия, както при изпускателната система на двигателя с вътрешно горене. Непосредствено преди измервателния участък за загряване на въздуха в тръбата е монтирана инжекционна газова горелка. За определянето на температурата на входа ($t_{вх.}$) и на изхода ($t_{изх.}$) на въздушното течение преминаващо през тръбата в началото и края на измервателния участък са разпробити два броя отвори с $d = 4mm$. За определяне на повърхностната температурата на тръбата в изследвания участък са монтирани шест броя

крепежни елементи с болт и гайка за фиксиране на спойката на термодвойките към тръбата, разстоянието между които е $lk=200mm$. Определянето на разхода на въздуха преминал през тръбата е направено, чрез предварително тарирано стесняващо устройство свързано с диференциален манометър.



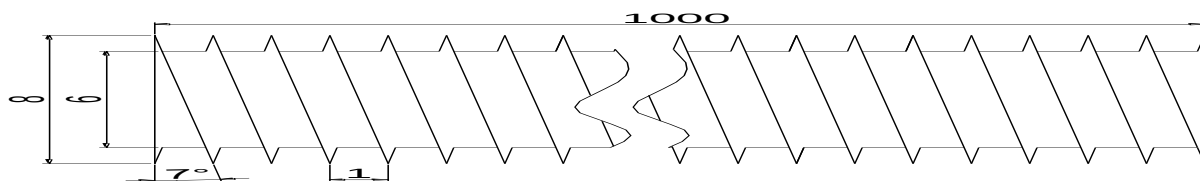
фиг. 4.1 Схема на експерименталната уредба

1. Кран за регулиране дебита на въздух, 2. Бленда, 3. Диференциален манометър, 4. Газова горелка, 5. Екран на горелката, 6. Миливолт метър, 7. Свързващи проводници, 8. Стойка

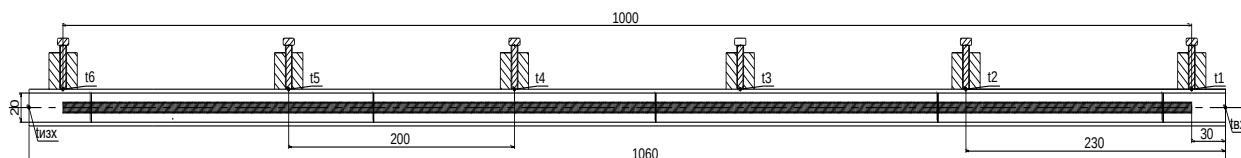
Целта на експерименталното изследване, е да се изследва влиянието на различни интензификатори върху топлообмена между газовата среда и повърхността на тръбата.

Проведени са четири серии опити. Първата серия опити е проведена без интензификатор, а останалите три с различни интензифициращи елементи поставени в тръбата и въздействащи върху структурата на потока. Всяка серия опити е равномерно дублирана, като измерените стойности величините, посочени в таблици 4.3, 4.13, 4.16 и 4.19 са осреднени.

Първият тип интензификатор представлява спирално-валцован стоманен прът с дължина $l=1000mm$. На фиг.4.6 е показан интензифициращият елемент, а на фиг.4.7 – начина му на монтаж в измервателния участък от експерименталния стенд.



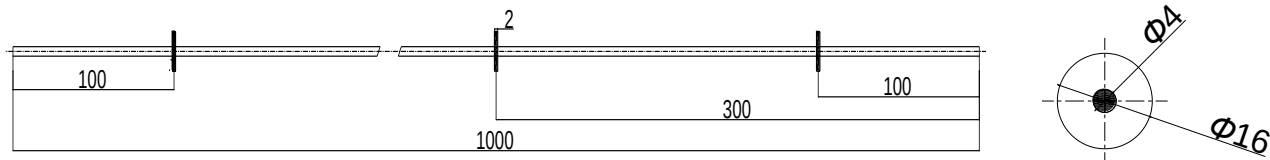
фиг. 4.6 Спирално валцован прът



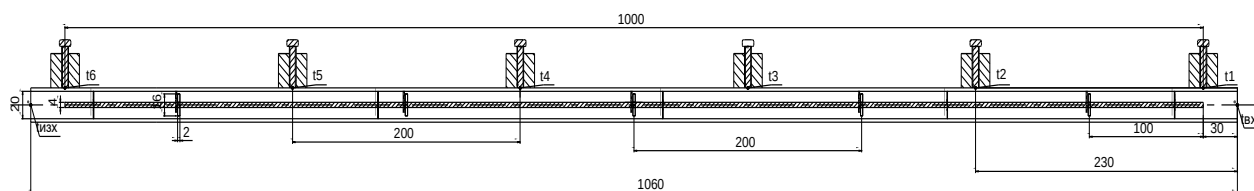
фиг. 4.7 Схема на монтиране на интензификатора

Вторият тип интензификатор представлява дисков интензификатор, геометрията на който, е показана на фиг. 4.8, а начина му на монтаж на фиг. 4.9. Представлява дискови интензифициращи елементи, изпълнени във вид

на тънки плътни дискове, фиксирани спрямо вътрешния диаметър на тръбата с центриращ тел с диаметър $d_{np}=4mm$. Разстоянието между отделните дискове и външния им диаметър е избрано съгласно [111]. Дължината на интензификатора е $l=1000mm$, дисковете са пет на брой разположени на разстояние един от друг $l_d=200mm$, а диаметъра им е $d_d=16mm$.

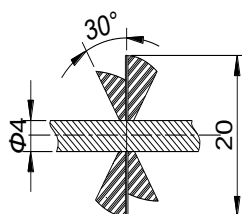


фиг. 4.8 Геометрия на дисковия интензификатор

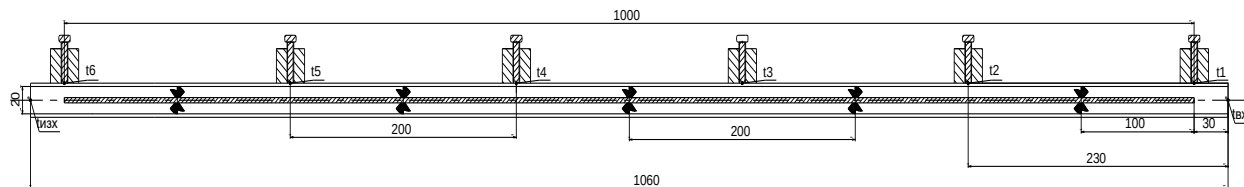


фиг. 4.9. Схема на монтиране на дисковия интензификатор

Третият тип интензификатор е пропелерен интензификатор, изработен от стоманен диск с диаметър равен на вътрешния диаметър на тръбата и дебелина $\delta=1mm$, който е разрязан по радиуса на четири места. Така образувалите се лопатки са огънати под ъгъл $\varphi=30^\circ$, спрямо равнината на диска – фиг.4.10. Пропелерите са пет на брой и са свързани помежду си със стоманен тел с диаметър $d_{np}=4mm$ и дължина $l=1000mm$, който минава през техните центрове. Разстоянието между отделните пропелери, е избрано съгласно [32], [111]. Начина на монтаж в измервателния участък на стенда е показан на фиг. 4.11.



фиг. 4.10. Геометрия на пропелерния (аксиално – лопатъчен) интензификатор



фиг. 4.11. Схема на монтиране на пропелерния интензификатор

4.4. Методика за обработка на експерименталните данни

4.4.1. Определяне на средната температура по дължината на тръбата:

$$t_w^{cp} = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6}{6}, \quad [^\circ C] \quad (4.2)$$

4.4.2. Определяне на средната температура на флуида (въздуха) в тръбата:

$$t_f^{cp} = \frac{t_{вх} - t_{изх}}{2}, [^{\circ}C] \quad (4.3)$$

4.4.3. Определяне на количеството топлина отдадено от флуида (въздуха) на тръбата:

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta t, [W] \quad (4.4)$$

където:

$m, [kg/s]$ – разход на въздух преминал през тръбата;

$c_p, [J/kg.K]$ – среден специфичен топлинен капацитет;

$\Delta t = t_{вх} - t_{изх}, [K]$ – температурна разлика;

4.4.4. Определяне на топлообменната повърхност:

$$F = \pi \cdot d \cdot L = 0,067 \text{ m}^2 \quad (4.5)$$

където:

$d = 0,02 \text{ m}$ – диаметър на тръбата;

$L = 1,06 \text{ m}$ – дължина на измервателния участък на тръбата

4.4.5. Определяне коефициента на топлопредаване:

$$\alpha = \frac{Q}{F(t_f^{cp} - t_w^{cp})}, [W / m^2.K] \quad (4.6)$$

4.4.6. Определяне числото на Нуселт:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda} \quad (4.7)$$

4.4.7. Определяне числото на Рейнолдс:

$$Re = \frac{\omega \cdot d}{\nu} \quad (4.8)$$

4.5. Обобщаване на експерименталните данни

Резултатите от проведените експерименти са обобщени чрез:

$$\alpha = C \cdot \frac{\lambda}{d} \left(\frac{\omega \cdot d}{\nu} \right)^b \quad (4.18)$$

Зависимост 4.18 обикновено се представя със следната степенна функция:

$$Nu = C \cdot Re^n \quad (4.19)$$

където:

C и n са постоянни константи с различни стойности в зависимост от обхвата на аргумента (Re).

4.6. Опитни данни и резултати

4.6.1. Анализ на получените резултати

4.6.1.1. Без интензифициране на топлообмена

При обработката на опитните данни са направени следните допускания:

- - за определящ размер е приет вътрешния диаметър на тръбата – $d_{втр.} = 20 \text{ mm}$;
- - за определяща температура е приета средната температура на

потока – t_f^{cp} .

В таблица 4.5. са представени обработените опитните резултати.

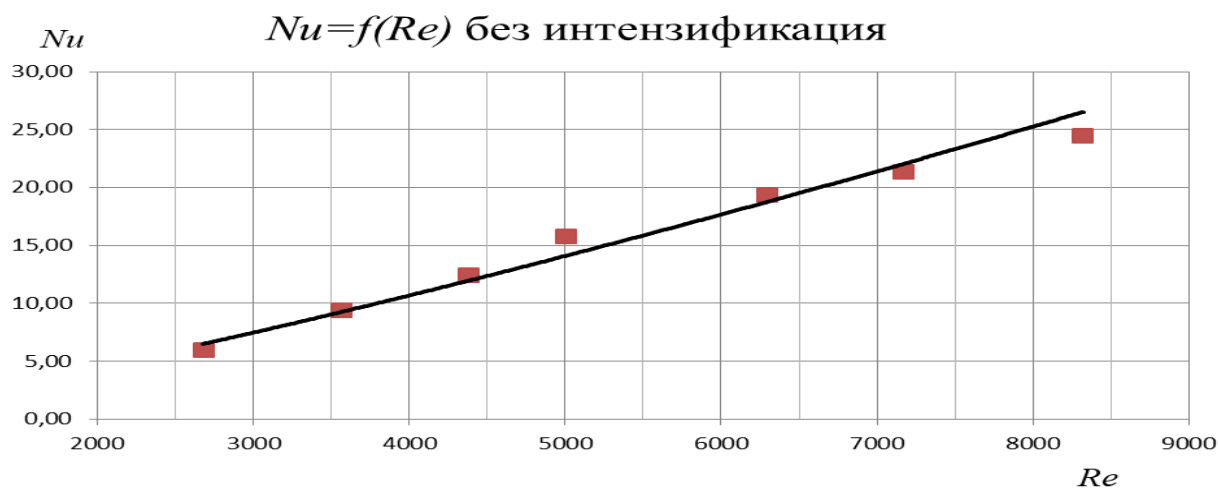
Табл.4.5.

без интензификация									
t_f^{cp}	t_w^{cp}	Δt	Q	F	α	$d_{втр.}$	v	Nu	Re
[°C]	[°C]	[°C]	[W]	[m ²]	$\left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$	[m]	[m/s]		
106,50	87,83	17,00	49,74	0,067	39,77	0,02	9,91	24,48	8321,3
109,50	88,83	19,00	48,33	0,067	34,91	0,02	8,71	21,32	7170,5
115,50	91,33	23,00	52,01	0,067	32,12	0,02	7,86	19,39	6294,8
125,00	94,17	30,00	55,01	0,067	26,63	0,02	6,52	15,77	5006,9
132,00	97,83	30,00	48,83	0,067	21,33	0,02	5,88	12,44	4378,6
158,00	102,00	46,00	63,95	0,067	17,04	0,02	5,32	9,40	3561,8
200,50	104,33	67,00	76,31	0,067	11,84	0,02	4,82	5,92	2678,4

При обработване на експерименталните данни, са изчислени критериите на подобие и е установена аналитичната връзка между тях. Зависимостта между критериите на подобие е представена във вид на степенна функция. За разгледания случай – без интензифициране на топлообмена, е получена следната частна критериална зависимост:

$$Nu = 0,0004.Re^{1,24} \quad (4.24)$$

На фиг. 4.12. графично е представена получената зависимост 4.24.



Фиг.4.12. $Nu=f(Re)$ без интензифициране на топлообмена

За целите на настоящото изследване е необходимо, да се сравни адекватността на получената зависимост (4.24), търсейки еквивалентност с експерименталните изследвания на други автори работили в това направление.

В свои разработки [52], [74], [99], [154] са работили по същата проблематика и са извели различни критериални уравнения. Направеният анализ, на техните разработки, ми дава основание да заключа, че получените

експериментални данни в настоящия труд, имат резултатност, която е изключително близка до експерименталните данни предложени от тях.

Въз основа на това, може да се направи заключението, че конструираната експериментална уредба е адекватно изпълнена, измервателната апаратура е правилно избрана и е с необходимата точност. Тава дава основание да се пристъпи към по-нататъшно изследване на топлообмена с различни интензифициращи елементи поставени в измервателния участък на стенда.

4.6.1.2. С интензифициращ елемент спирално валцован стоманен прът

В таблица 4.9. са представени опитните резултати.

Табл.4.9.

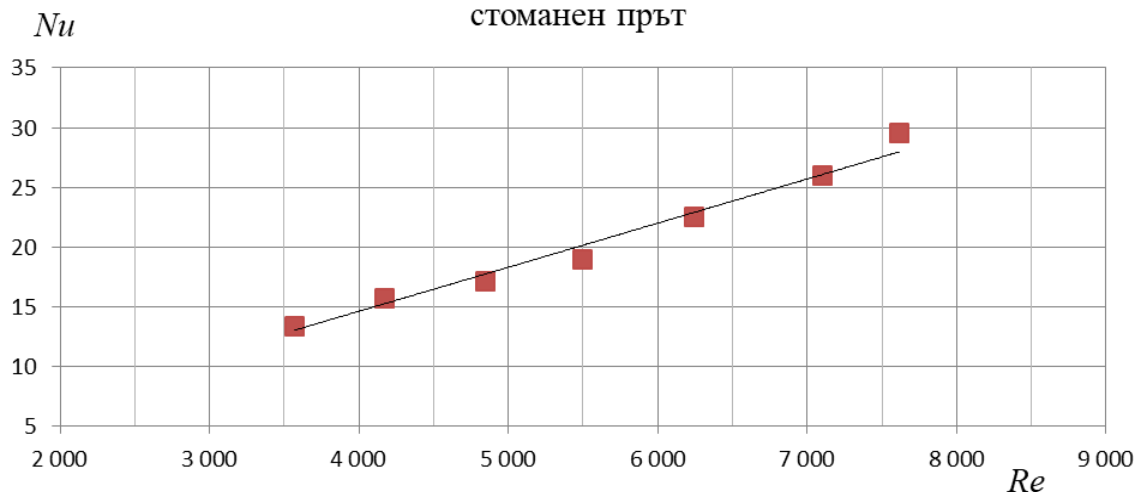
с интензифициращ елемент - спирално валцован стоманен прът									
t_f^{cp}	t_w^{cp}	Δt	Q	F	α	$d_{втр.}$	v	Nu	Re
[°C]	[°C]	[°C]	[W]	[m ²]	$\left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$	[m]	[m/s]		
145,50	86,50	71,00	206,55	0,067	52,25	0,02	10,85	29,56	7614,3
150,00	90,17	68,00	185,92	0,067	46,38	0,02	10,28	26,02	7103,1
156,00	88,17	76,00	184,68	0,067	40,63	0,02	9,26	22,51	6247,0
161,00	85,67	80,00	174,73	0,067	34,62	0,02	8,31	18,98	5499,0
171,00	83,67	96,00	186,06	0,067	31,80	0,02	7,61	17,11	4846,7
184,50	83,33	119,00	203,01	0,067	29,95	0,02	6,90	15,69	4170,0
190,50	82,17	127,00	187,48	0,067	25,83	0,02	6,03	13,37	3571,4

След обработване на експерименталните данни, за случая с интензифициращ елемент – спирално валцован стоманен прът, е получена следната частна критериална зависимост:

$$Nu = 0,0034.Re^{1,0095} \quad (4.29)$$

На фиг. 4.14. графично е представена получената зависимост 4.29.

$Nu=f(Re)$ с интензифициращ елемент - спирално валцован стоманен прът



Фиг.4.14. $Nu=f(Re)$ с интензифициращ елемент – спирално валцован стоманен прът

4.6.1.3. С дискови интензифициращи елементи.

В таблица 4.12. са представени опитните резултати.

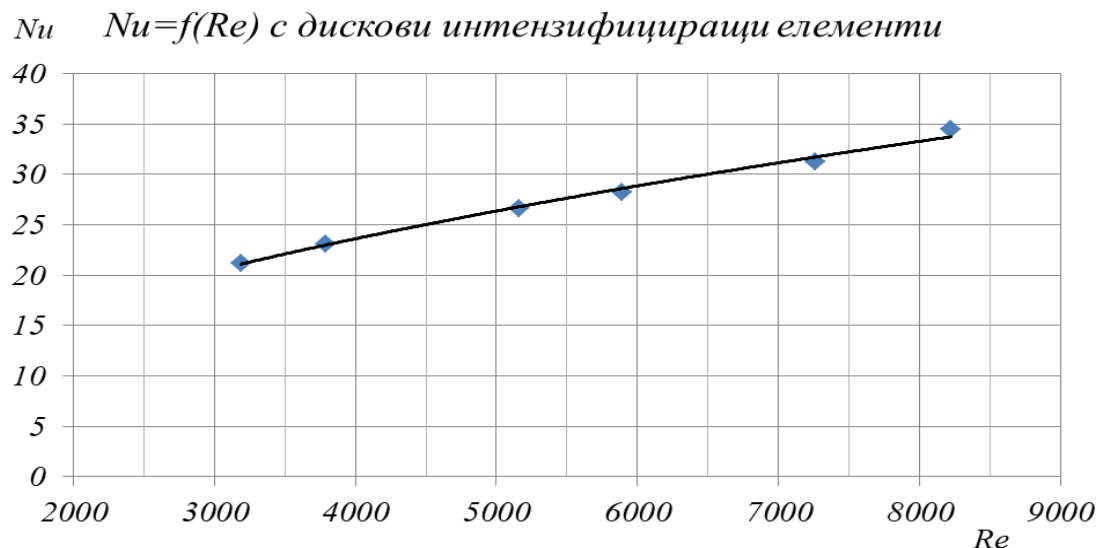
Табл.4.12.

с дискови интензифициращи елементи									
t_f^{cp}	t_w^{cp}	Δt	Q	F	α	$d_{втр.}$	v	Nu	Re
[°C]	[°C]	[°C]	[W]	[m ²]	$\left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$	[m]	[m/s]		
99,00	69,17	38,00	107,40	0,067	53,73	0,02	9,41	34,46	8218,7
100,00	67,17	44,00	110,44	0,067	50,20	0,02	8,40	31,28	7259,6
102,00	63,00	58,00	118,96	0,067	45,53	0,02	6,88	28,25	5888,5
110,00	61,17	78,00	142,71	0,067	43,62	0,02	6,26	26,64	5157,0
143,00	58,50	160,00	230,12	0,067	40,65	0,02	5,33	23,14	3786,3
153,00	57,00	198,00	244,34	0,067	37,99	0,02	4,67	21,18	3188,8

След обработване на експерименталните данни, за случая с интензифициращи дискови елементи, е получена следната частна критериална зависимост:

$$Nu = 0,39.Re^{0,4947} \quad (4.30)$$

На фиг. 4.15. графично е представена получената зависимост 4.30.



Фиг.4.15. $Nu=f(Re)$ с дискови интензифициращи елементи

4.6.1.4. С пропелерни интензифициращи елементи.

В таблица 4.15. са представени опитните резултати.

След обработване на експерименталните данни, за случая с пропелерни интензифициращи елементи, е получена следната частна критериална зависимост:

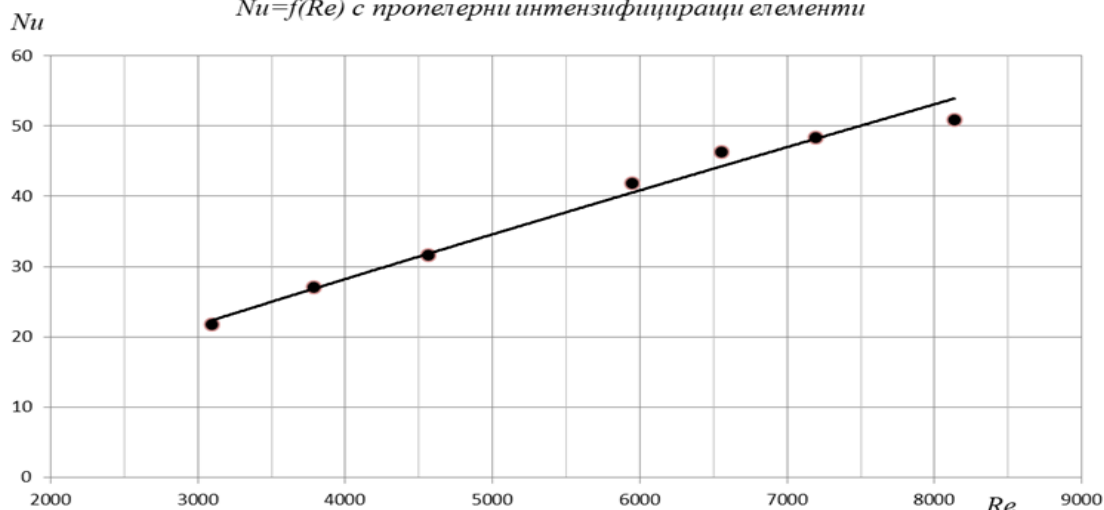
$$Nu = 0,0147.Re^{0,9114} \quad (4.31)$$

Табл.4.15.

с пропелерни интензифициращи елементи									
t_f^{cp}	t_w^{cp}	Δt	Q	F	α	$d_{втр.}$	v	Nu	Re
[°C]	[°C]	[°C]	[W]	[m ²]	$\left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$	[m]	[m/s]		
73,00	65,67	14,00	37,33	0,067	75,98	0,02	8,27	50,87	8132,9
76,00	62,33	28,00	66,67	0,067	72,82	0,02	7,43	48,32	7191,7
82,00	61,67	44,00	96,78	0,067	71,04	0,02	6,99	46,28	6551,8
95,00	61,50	72,00	143,12	0,067	63,76	0,02	6,27	41,81	5949,6
109,00	66,17	92,00	148,52	0,067	51,75	0,02	5,51	31,67	4560,5
116,50	68,00	107,00	145,75	0,067	44,85	0,02	4,74	27,04	3788,0
142,50	66,67	167,00	194,57	0,067	38,29	0,02	4,34	21,83	3093,7

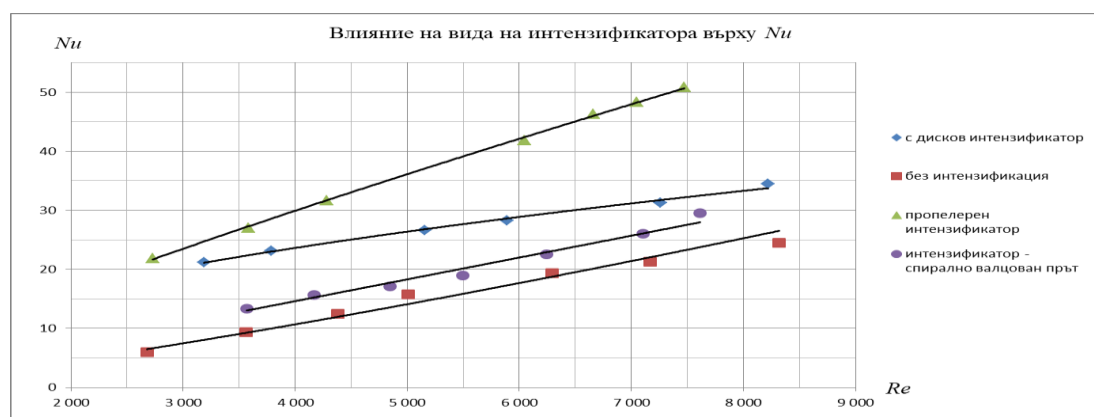
На фиг. 4.16. графично е представена получената зависимост 4.31.

$Nu=f(Re)$ с пропелерни интензифициращи елементи



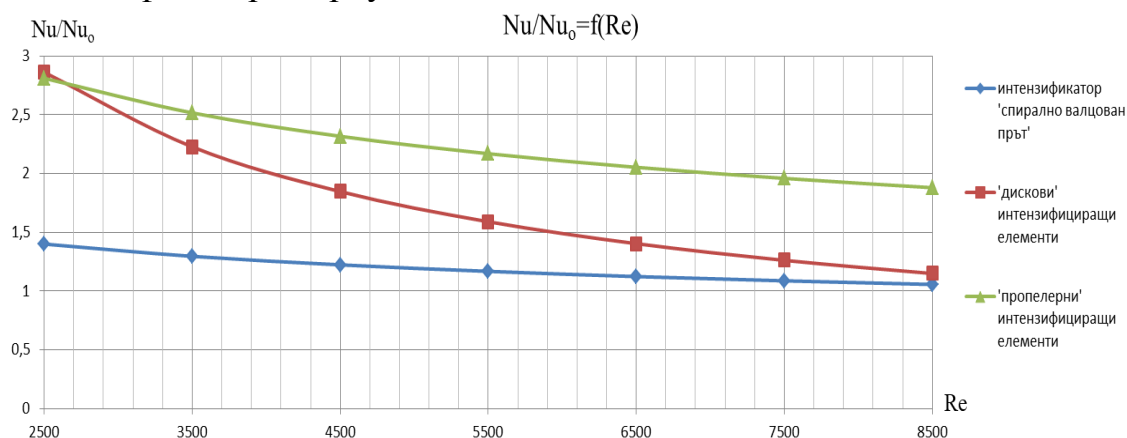
Фиг.4.16. $Nu=f(Re)$ с пропелерни интензифициращи елементи

На фиг. 4.17. графично е представено влиянието на вида на интензификатора върху Nu.



Фиг.4.17. Влияние на вида на интензификатора върху Nu

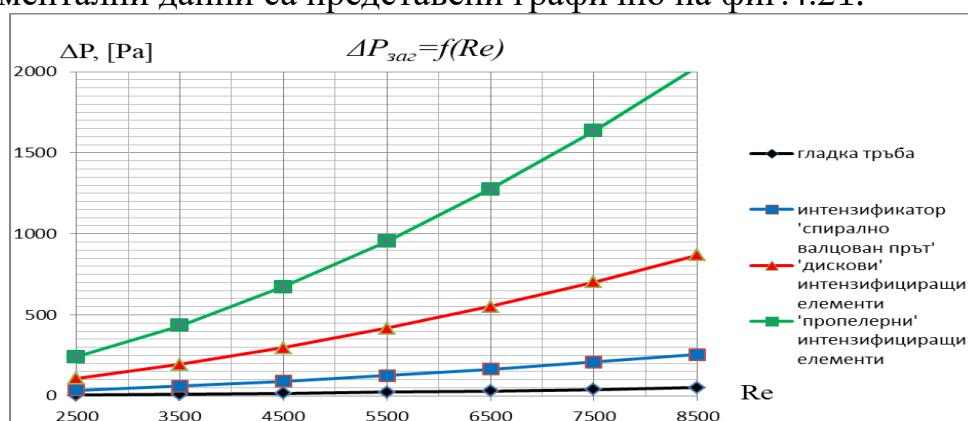
На фиг.4.19 е представено влиянието на Re върху Nu/Nu_0 за използваните различни интензификатори. Въведените означения са съответно Nu – за различния тип интензификатор, а Nu_0 – за гладка тръба без интензифициране. В диапазона $Re=2500\div 3500$ се наблюдава значително нарастване на отношението Nu/Nu_0 , за съответния интензификатор. При увеличаване на Re , тази тенденция намалява, но се запазва влиянието на интензификатора върху топлообмена.



фиг. 4.19. Зависимост на $Nu/Nu_0 = f(Re)$

4.7. Експериментално определяне и оценка на хидравличните загуби

Наред с изследването на топлопредаването и възможностите за интензифициране на топлообмена с различни интензификатори, е необходимо да се разгледат и хидравличните загуби в канала. За целта са проведени експериментални изследвания за определяне изменението на хидравличните загуби в измервателния участък на канала. Получените експериментални данни са представени графично на фиг.4.21.

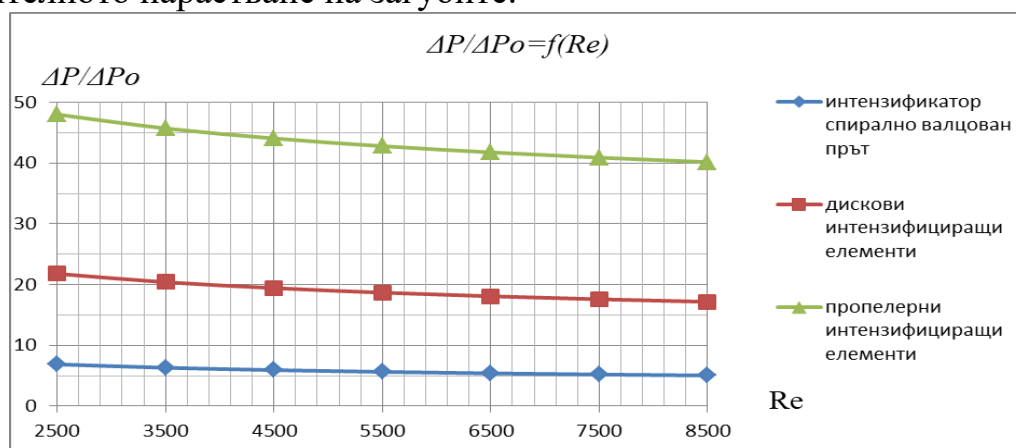


фиг. 4.21. Изменението на налягането в измервателния участък на тръбата в зависимост от интензификатора

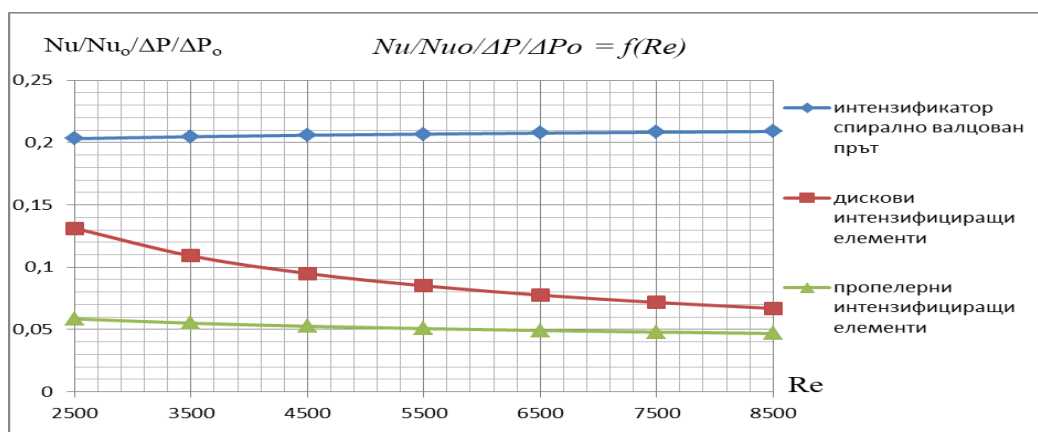
На фиг. 4.22 графично са представени получените зависимости, относно нарастването на хидравличните загуби за съответния интензифициращ елемент отнесени към гладка тръба.

На фиг. 4.23. е представено отношението на относителното нарастване на топлоотдаването в измервателния участък на тръбата със съответния

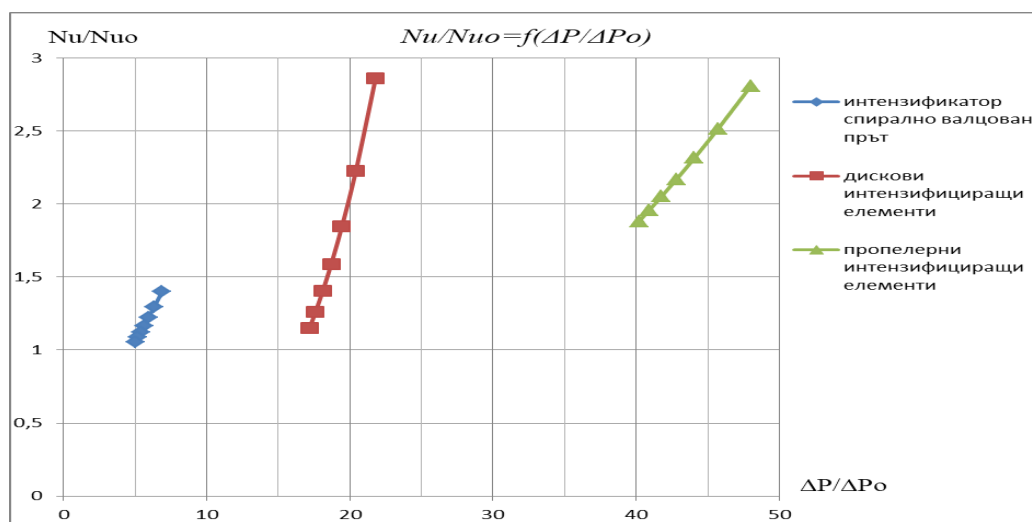
интензифициращ елемент към допълните загуби на налягане в участъка, а на фиг.4.24 относителното нарастване на топлообмена във функция от относителното нарастване на загубите.



фиг. 4.22. Нарастване на загубите на налягане, спрямо гладка тръба в измервателния участък, в зависимост от интензификатора



Фиг.4.23. Относителното нарастване на топлоотдаването в измервателния участък на тръбата със съответния интензифициращ елемент към допълните загуби на налягане в участъка



Фиг. 4.24. Относителното нарастване на топлообмена във функция от относителното нарастване на загубите

4.8. Обобщаване и анализ на получените резултати

От проведените експериментални изследвания и след обработка на получените резултати могат да се изведат следните по – важни изводи:

➤ При всички интензификатори се наблюдава нарастване на топлопредаването от страна на въздуха към стената на тръбата, като повишаването на коефициента на топлопредаване е най – голямо за $Re=2800\div3500$, съответно за:

▶ за спирално – валцования прът коефициента на топлопредаване нараства 1,4 пъти;

▶ за дискови интензификатори коефициента на топлопредаване нараства 2,5 пъти;

▶ за пропелерни интензификатори коефициента на топлопредаване нараства 3,0 пъти.

➤ При нарастване на числото на Рейнолдс в диапазона $Re=3500\div7000$ влиянието на интензификатора намалява и над $Re>7000$, остава постоянно съответно за:

▶ за спирално – валцования прът коефициента на топлопредаване остава приблизително 1,2 пъти по – голям спрямо гладката тръба;

▶ за дискови интензификатори коефициента на топлопредаване остава приблизително 1,3 пъти по – голям спрямо гладката тръба;

▶ за пропелерни интензификатори коефициента на топлопредаване остава приблизително 1,8 пъти по – голям спрямо гладката тръба.

➤ Пропелерните интензификатори оказват най – голямо влияние върху интензифицирането на топлообмена и нарастването на коефициента на топлопредаване при тях е най – голямо, за разглеждания диапазон на числото на Рейнолдс;

➤ Нарастването на хидравличните загуби при пропелерните интензификатори е най – голямо;

➤ Нарастването на хидравличните загуби спрямо гладка тръба ($\Delta P/\Delta P_0$) е най – голямо в диапазона $Re=2500\div3500$.

➤ От графиката на фиг.4.24 може да се направи заключение, че използването на дискови интензифициращи елементи, в конкретния случай, е най-удачно. Това се дължи на факта, че при този тип интензификатор, относителното нарастване на коефициента на топлопредаване, спрямо относителното нарастване на хидравличните загуби предлага, най-доброто съчетание между дадения тип интензификатор и нарастването на хидравличните загуби.

4.9. Предложение за топлообменен апарат за утилизиране на топлината на когенератор на база ДВГ

Проектирането и успешната експлоатация на когенератори на база ДВГ, е свързано с разработването на високоефективни, компактни

кожухотръбни топлообменни апарати за утилизирание на топлината на изходящите газове от ДВГ.

Тъй като в дисертационния труд се разглежда топлообменен апарат „продукти на горене – охлаждаща течност“ в система на когенератор на база ДВГ, като част от технологична верига за усвояване на топлина, от съществено значение са масата на апарата, неговият обем, монтажната му площ и не на последно място разхода на енергия за осъществяване на топлообменния процес.

Въз основа на проведените експерименти и получените резултати, може да се предложи компактна конструкция на кожухотръбен топлообменен апарат за утилизирание на топлината от продуктите на горене на ДВГ в система на когенератор. Избраните интензифициращи елементи, поставени в тръбите на топлообменника, ще оптимизират топлопредаването от страната на работния флуид, въпреки специфичните ограничения на налягането на отработените газове на ДВГ. Компактността на новата конструкция ще зависи главно от увеличаването на коефициента на топлопредаване от страната на продуктите на горене.

При втичането на отработените газове от ДВГ в тръбния сноп на топлообменния апарат, продуктите на горене допълнително се завихрят, което води и до увеличаване на топлопредаването в началния участък на тръбите. След преминаване на известна дължина от тръбния сноп, течението се стабилизира, заемайки установен скоростен и температурен профил. Поставянето на интензифициращи елементи по цялата дължина на тръбите, ще доведе до разрушаване на дебелината на граничния слой и интензифициране на топлообмена.

Проектирането и изработването на кожухотръбен топлообменен апарат, с интензифициращи елементи, ще увеличи количеството на усвоената топлина от продуктите на горене от ДВГ, средно с 1,5 пъти, в сравнение с класическата конструкция на топлообменния апарат.

Такъв тип топлообменен апарат с нова конструкция, ще бъде с размери от 1,2 до 1,4 пъти по-малък, а масата му с 15–20% по-ниска в сравнение с топлообменниците, с традиционна конструкция със същата топлинна мощност. Интензифицирането на топлообмена ще доведе до намаляване на общите загуби в когенератора на база ДВГ на $6\div 8\%$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Дисертационния труд отразява влиянието на основни режимни и конструктивни параметри влияещи върху интензифицирането на топлообмена между газова среда и твърдо тяло. Тази постановка е важна от практическа гледна точка, доколкото е налице възможността за чувствително интензифициране на топлообмена в кожухотръбни топлообменни апарати „продукти на горене – охлаждаща течност“ в система на когенератор на база ДВГ, както на съществуващи, така и при конструиране на нови топлообменни апарати. Актуалността на получените експериментални резултати произлиза от поетите ангажменти на Р. България, относно

редуцирането на емисии CO_2 и постигане на съответствие с редица директиви на ЕС. В дисертационния труд е показан подход за интензифициране на топлообмена, с цел оптимизация на системите за когенерация на база ДВГ.

Проведените експериментални изследвания, могат да се представят чрез следните основни резултати:

- Анализирани са възможностите за внедряване на когенерация на база ДВГ и работата на промишлен когенератор. Доказано е, че внедряването на високоефективен комбиниран добив на енергия, предлага значителен потенциал за енергийни спестявания, а проведеното проучване на въведена в експлоатация когенерационна инсталация необходимостта от усъвършенстване на топлообменната апаратура;

- Експериментално е изследвана работата на лабораторен стенд на когенератор на базата на ДВГ при различни работни режими. При анализа работата на топлообменния апарат „продукти на горене – вода“, е доказана необходимостта от интензифицирането на топлообмена с цел повишаване общия КПД на инсталацията;

- Материализиран е физически модел на една тръба от топлообменния апарат „продукти на горене – вода“ и са изследвани различни конструктивни и режимни параметри целящи интензифицирането на топлообмена между газова среда и твърдо тяло.

- Получените резултати по интензификация на конвективния топлообмен са безусловно приемливи само за условия на когенератор.

- Получени са експериментални резултати във вид на критериални зависимости – със и без интензификация на топлообмена;

- Дадено е принципно предложение за топлообменен апарат за утилизирание на топлината на когенератор на база ДВГ.

Положителните резултати от проведените експериментални проучвания показват, че използването на интензифициращи елементи, поставени на пътя на газовия поток, са приложими за кожухотръбни топлообменни апарати, използвани за утилизация на топлина при когенерация на база ДВГ.

Резултатите от извършената работа добавят допълнителна информация към въпросите на теорията на топлопреминаването и са насочени към решаване на проблема за интензифициране на конвективния топлообмен при движението на газова среда при условия близки до характеристиките на когенератор.

НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ И ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

Научно приложни приноси от дисертационния труд

- Получени са балансови характеристики, при работа на лабораторен когенератор в променлив режим;

➤ Експериментално е изследван конвективния топлообмен в система „продукти на горене – тръба“ в условия близки до характеристиките на когенератор.

Приложни приноси:

➤ Получен е интервал на изменение на числото на Рейнолдс (Re) в кожухотръбен топлообменен апарат, от страната на газовата фаза;

➤ Получени са критериални уравнения от вида $Nu=f(Re)$ за гладка тръба и при наличие на интензификатори на топлообмена;

➤ Доказано е, че при условията на експеримента, средния коефициент на топлоотдаване, при наличие на интензифициращи елементи, надвишава над 1,5 пъти, тоя при гладка тръба;

➤ Получените резултати във връзка с интензификацията на топлообмена, са конструктивна предпоставка за намаляване габаритите на топлообменната апаратура при когенератори.

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Костов П., К. Костов, Анализ на основните характерни особености на Со-генератори на база ДВГ и газова турбина, Техника, технологии и образование, Сборник научни доклади, 2007, стр.202-204, ISSN 978-954-9999-54-9.

2. Костов П., К. Костов, Експериментална уредба за изследване работата на Со – генератор на база ДВГ при променливо натоварване, Механика на машините № 70 кн.4. 2007, стр.47-50, ISSN 0861-9727.

3. Костов П., К. Костов, Топлинен баланс на Со-генератор на база ДВГ при синхронна честота на въртене $n=3000 \text{ min}^{-1}$, Механика на машините №72, кн. 6, 2007, стр.57-59, ISSN 0861-9727.

4. Костов П., К. Костов, Експериментална уредба за изследване възможностите за интензифициране на топлообмена в топлообменен апарат продукти на горене – вода в система на когенератор, Механика на машините №83, кн.4, 2009, стр.08-10, ISSN 0861-9727.

5. Костов К., Ч. Николов, А. Овчаров, Анализ на работата на градска пречиствателна станция за отпадни води- гр. Сливен, Топлотехника №8,кн.3, 2014 стр.11-13, ISSN 1314-2550.

6. Костов К., Експериментална уредба за изследване коефициента на топлопредаване при движение на въздух в канал с кръгло напречно сечение, Топлотехника №14,кн.1, 2019 стр.27-31, ISSN 1314-2550.

SUMMARY

EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE POSSIBILITY FOR INTENSIFYING THE COMPLICATED HEAT EXCHANGE IN THE CONDITIONS OF CO-GENERATOR BASED ON AN INTERNAL COMBUSTION ENGINE

Konstantin Vasilev Kostov, M. Sc. eng.

The dissertation thesis reflects the influence of basic regime and constructive parameters that influence the intensification of the heat exchange between the gas environment and the solids. This staging is important from a practical point of view as there is the possibility of significantly intensifying heat transfer in the heat exchangers "combustion products - cooling liquid" in an internal combustion engine system of both existing and construction of new heat exchangers. The topicality of the experimental results obtained stems from the commitments undertaken by the Republic of Bulgaria concerning the reduction of CO₂ emissions and compliance with a number of EU directives. The dissertation thesis shows an approach for intensification of the heat exchange in order to optimize the cogeneration systems based on an internal combustion engine.

The positive results of the conducted experimental studies have shown that the use of intensifying elements on the gas flow path is applicable on heat pipe exchangers, used for the utilization of heat in cogeneration based on an internal combustion engine.

The results of the work add additional information to the questions of the theory of heat transfer and are aimed at solving the problem of intensification of the convective heat exchange in the movement at the gas medium in the mode close to the transition.