

**БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ
ИНСТИТУТ ПО ИНЖЕНЕРНА ХИМИЯ**

Александър Георгиев Георгиев

**ОЦЕНЯВАНЕ НА СМЕСЕНИ УРЕДБИ С АЛТЕРНАТИВНИ
ИЗТОЧНИЦИ НА ЕНЕРГИЯ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертационен труд за присъждане на научната степен
“Доктор на науките”

Област: Природни науки, математика и информатика

Професионално направление: 4.2. Химически науки

Научна специалност: Процеси и апарати в химичната и
биохимичната технология

Научно жури:

1. Проф. д-тн Венко Николаев Бешков
2. Проф. д-р инж. Георги Иванов Вълчев
3. Проф. д-р Соня Стоянова Табакова
4. Проф. д-р инж. Илия Кръстев Илиев
5. Проф. д-р Алексей Димитров Бендерев
6. Доц. д-р Татяна Стефанова Петрова
7. Доц. д-р Петър Николов Гергинов

София 2021

Александър Георгиев

В дисертацията са представени въведение, литературен обзор, цел и задачи, авторски изследвания в две глави, общи изводи, основни приноси, библиография и списък на публикациите на автора в пълен текст по дисертацията.

Дисертацията съдържа е 345 страници, като са включени 201 фигури и 29 таблици. Библиографията обхваща 229 източника. Списъкът на авторските публикации в пълен текст по темата представя 36 статии. От тях 15 са в списания с импакт фактор за съответната година, 11 са публикувани в специализирани международни списания или в пълен текст в сборници от международни научни форуми с редактор и издателство, като 15 са отпечатани през последните 5 години (2016 – 2020). Авторът на дисертацията е на първо място в 17 от публикациите. Представените публикации са цитирани общо 244 пъти.

Авторът на дисертацията работи като професор в Института по инженерна химия – БАН (ИИХ – БАН).

Дисертационният труд е обсъден от Колоквиума на ИИХ-БАН за откриване на процедура по защита на заседание, състояло се на 04.11.2021г. (Протокол №4/ 4.11.2021) и с решение на НС на ИЕЕС-БАН от 11.11.2021г. (Протокол № 14/ 11.11.2021) е открита процедура по защита на дисертацията. На заседание на Колоквиума на ИИХ-БАН от 25.11.2021г. (Протокол №7/ 25.11.2021) е извършена предварителна защита и с последващо решение на НС на ИЕЕС-БАН от 15.12.2021 (Протокол №16/ 15.12.2021) е избрано Научно жури в състав:

1. Проф. д-н Венко Николаев Бешков (ИИХ – БАН) (вътрешен член)
2. Проф. д-р инж. Георги Иванов Вълчев (УХТ, гр. Пловдив)
3. Проф. д-р Соня Стоянова Табакова (Институт по механика – БАН)
4. Проф. д-р инж. Илия Кръстев Илиев (Русенски университет)
5. Проф. д-р Алексей Димитров Бендерев (Геологически институт – БАН)
6. Доц. д-р Татяна Стефанова Петрова (ИИХ – БАН) (вътрешен член)
7. Доц. д-р Петър Николов Гергинов (Геологически институт – БАН)

Резерви:

1. Проф. д-р Драгомир Симеонов Янков (ИИХ – БАН) (вътрешен член)
2. Доц. д-р инж. Ангел Костадинов Терзиев (ТУ – София)

Защитата на дисертационния труд ще се състои от 14:00 h на 11.03.2022г. в Заседателната зала на ИИХ-БАН, ул. „Акад. Г. Бончев”, бл. 103, София.

С Ъ Д Ъ Р Ж А Н И Е

| | |
|--|-----------|
| Въведение | 4 |
| 1. Основни изводи от литературния обзор..... | 5 |
| 2. Цел и задачи на дисертационния труд..... | 7 |
| 3. Компоненти на смесени уредби с алтернативни енергийни източници (АЕИ)..... | 9 |
| 3.1. Вакуумен слънчев колектор с плосък абсорбер и топлинна тръба | 9 |
| 3.2. Топлинни акумулатори..... | 14 |
| 3.2.1. Смесителен воден акумулатор със стратификация..... | 14 |
| 3.2.2. Воден акумулатор с четворна серпантина..... | 15 |
| 3.2.3. Определяне на топлинни характеристики (ОТХ) на сезонни Подземни топлинни енергийни акумулатори (ПТЕА)..... | 16 |
| 3.2.4. Латентен топлинен акумулатор (ЛТА) с материали с промяна на фазовото състояние (МПФС)..... | 25 |
| 4. Смесени уредби с алтернативни енергийни източници (АЕИ)..... | 30 |
| 4.1. Слънчеви колектори с воден акумулатор..... | 30 |
| 4.2. Хладилна инсталация с вградени слънчеви колектори и топлоакумулатор..... | 35 |
| 4.3. Вертикален топлинен енергиен акумулатор (ВТЕА) със слънчеви колектори..... | 37 |
| 4.4. Фотоволтаично-топлинни (PV/T) инсталации..... | 40 |
| 4.5. Земно базирана термопомпена (ЗБТП) система със слънчеви колектори..... | 46 |
| 4.6. Земно базирана термопомпена (ЗБТП) уредба използваща материали с промяна на фазовото състояние (МПФС)..... | 59 |
| 4.7. Смесена микро-когенерационна система с фотоволтаични панели и Стърлинг двигател за локално отопление..... | 61 |
| 5. Общи изводи..... | 63 |
| 6. Основни приноси..... | 65 |
| 7. Публикации на автора в пълен текст по дисертацията..... | 68 |

ВЪВЕДЕНИЕ

Дисертацията обхваща голям период от време (над 30г. – най-ранната приложена статия е публикувана през 1989г.). След приключването на докторската ми дисертация през 1988г. се занимавам изключително в областта на Възобновяемите енергийни източници (ВЕИ), предимно в тяхната топлотехническа част. От началото на века (2001г.) тази тематика става изключително приоритетна в Европейската общност (ЕО). Въведен е закон за страните-членки да увеличат двойно през следващите 10г. производството на енергия от ВЕИ. През 2011г. бе въведен следващия закон на ЕО – да се увеличи до 25 % производството на енергия от ВЕИ в страните членки (после тази квота бе променена за различните страни, за България бе 16 %). Тенденцията е през 2050г. около 60 % от енергията, произвеждана в ЕО да бъде от ВЕИ.

В България също се обръща внимание на този отрасъл от енергетиката. Първите слънчеви инсталации (плоски водни слънчеви колектори с прилежащите им акумулатори) бяха монтирани и използвани по Черноморието в началото на 80-те години на миналия век. Тогава в София бе създаден комбинат „Нови енергийни източници“, който започна производство на различни уредби, свързани с ВЕИ. Към комбината бе създаден и институт, а в ТУ София започнаха работа някои докторанти по тематика на ВЕИ. Някои заводи започнаха производство на елементи от тези инсталации (в алуминиевия завод в Шумен се произвеждаха слънчеви колектори, а в Разград се започна производство на различни компоненти от тези системи). Веднага след промяната през 1989г. имаше бум на това производство (за съжаление неуспешно, защото всеки искаше да произвежда нещо атрактивно, но в повечето случаи несъответстващо на реалността). За щастие след влизането на България в ЕО имаше друг бум, този път успешен и адекватен, като в страната бяха масово инсталирани слънчеви панели за производство на електроенергия и ветрови генератори.

Към днешна дата ВЕИ са вече доста разпространени и познати в България. Тук обаче идва на дневен ред въпросът дали източниците са “Нови” (както се казваше комбинатът), „Възобновяеми” или просто „Алтернативни”. Тези източници определено не са “Нови”, защото главният от тях е Слънцето. Доколко всеки от тях е „Възобновяем” е също спорен въпрос (особено касаещ инсталациите, които ги обслужват). Но атрактивни в момента са „Алтернативните”, защото те включват ВЕИ, а от друга страна по някои от параметрите им към тях можем да причислим и други материали (не само ВЕИ). Елементарен пример – биомасата не е възобновяем (от гледна на точка на това, че изчезва след използването ѝ), но е възобновяем от гледна точка това, че е наличен отново в следващите 1 до 20г. В същото време парафините (като атрактивен представител на материалите с промяна на фазовото състояние, МПФС) се произвеждат от

нефт, т.е. те не са възобновяеми. Но те обикновено имат цикли на стапяне/втвърдяване над 200 пъти, което ги нарежда достойно в сферата на ВЕИ.

Дисертацията е базирана на статии, публикувани в различни сфери на ВЕИ (от слънчевите колектори и инсталации, до геотермалните уредби и системи с МПФС). През години съм работил с много колективи (повечето от тях чуждестранни) и в различни държави (предимно в Германия и Чили – около 3г. общо). В резултат са налице изследвания на множество разнообразни смесени уредби с ВЕИ и техните компоненти. Много от тях са описани в дисертацията и е направена оценка на това, доколко те са ефективни и авангардни. Тук трябва да отбележа, че приложената библиографска справка, както и всички представени експерименти и изследвания са строго актуални към датата на публикуване на статиите. В течение на годините (а това са повече от 30г.) са настъпили промени, през които определени тематика са вече доста разработени и не толкова авангардни както в началото. Обръщам внимание на този факт, за да няма съмнение при оценката на някои от споменатите приноси в края на дисертацията.

Тъй като почти всички представени статии са на латиница (немски или английски), има смесица от кирилица и латиница при индексите. Отделно почти всички фигури съм ги оставил в оригиналния им вид (на български или английски). Същото важи и за съкращенията (някои от тях все още нямат аналози в българския език, а други се възприемат от специалистите в оригиналния им вид.

1. ОСНОВНИ ИЗВОДИ ОТ ЛИТЕРАТУРНИЯ ОБЗОР

Топлинната уредба е единица, която се състои от няколко компонента. Агрегатът съдържа не само топлинни елементи – има и електрически и механични части. Обикновено терминът "смесена уредба" се отнася до поне два вида инсталации. Те съдържат елементи като например материали с промяна на фазовото състояние (МПФС), термопомпа, слънчеви колектори, воден сезонен акумулатор и подземен топлинен енергиен акумулатор, които могат да се комбинират с електрически уреди (например фотоволтаични/ топлинни, PV/T колектори) и втора термопомпа, с цел подобряване енергийната ефективност на системата.

Въз основа на представения литературен обзор могат да се направят следните основни изводи за отделните компоненти, както и за различните видове смесени уредби с алтернативни енергийни източници:

- Представените в обзора различни видове слънчеви колектори (плоски водни слънчеви колектори, вакуумни течностни слънчеви колектори, въздушни слънчеви колектори и концентриращи слънчеви колектори) имат различни предимства и недостатъци, свързани както с техническите им характеристики, така и с икономическата им реализация.

Сравнително високите стойности на КПД при високи температурни разлики позволяват ефективното използване на вакуумните слънчеви колектори при достигане на високи температури на соловия разтвор;

- Съществуващите топлинни акумулатори се делят на устройства, съхраняващи явна и латентна (скрита) топлина от една страна, и на акумулатори на топлина на дневна или сезонна (3 до 6 месеца) база от друга страна. Смесителният воден акумулатор на явна топлина със стратификация е интересен за практиката поради наличието на различни температури по височина на акумулатора. Подземните акумулатори (и най-вече Вертикалният топлинен енергиен акумулатор, ВТЕА) играят съществена роля при сезонното акумулиране на топлина, като важен елемент е не само конструкцията им, но и експерименталните начини на определяне на топлинните свойства на почвата около тях, както и методите за обработка на получените данни. Латентните акумулатори са в момента една от най-перспективните технологии при акумулирането на топлинна енергия. Тяхното развитие е в две насоки – използване на подходящи материали и избор на конструкция, осигуряваща добър топлообмен. Различният начин на моделиране, както и последващите симулации водят до по-добро изследване на съответния акумулатор;

- Литературният обзор обхваща слънчеви уредби, които се използват за подгръване на вода за битови нужди и за отопление. Инсталации, съдържащи вакуумни слънчеви колектори с топлинна тръба и подходящ акумулатор могат при определени условия да достигнат до температура повече от 100 °С на подгръвания флуид;

- Годишният период на експлоатация на слънчевите системи се удължава ако бъдат присъединени към изпарителя на термопомпена уредба. Така т. нар. Слънчево базирани термопомпени (СБТП) системи представляват интерес за изследване и внедряване в практиката;

- Няколко вида подземни акумулатори се използват в практиката. Най-атрактивен от тях е ВТЕА поради своята универсалност и независимост от околната среда. Той използва земята не само като източник на енергия, но и като акумулатор на топлина, който се зарежда напр. от слънчеви колектори;

- Фотоволтаичният/ топлинен (PV/T) панел е смес от фотоволтаични клетки и слънчев топлинен колектор. Тази комбинация води до намаляване работната температура на фотоволтаичните клетки и повишаване на ефективността им, като допълнително се произвежда и топлинна енергия. Независимо от голямото конструктивно разнообразие на този вид панели е необходимо е да се наблегне на подробното изследване (експерименти с прецизно измерване и подобаваща обработка на резултатите) не само на тези с най-елементарна структура, но и на PV/T панели с по-голяма ефективност (напр. PV/T колектор с концентратор);

Оценяване на смесени уредби с алтернативни източници на енергия

- Земно базираните термопомпени (ЗБТП) уредби използват земята като източник на топлина или студ и предават получената енергия на по-високо ниво чрез термопомпата за отопление или охлаждане. Една такава инсталация, комбинирана със слънчеви колектори може да работи в различни режими (напр. зареждане на водния акумулатор или вертикалния топлоенергиен акумулатор, отопление на сгради използвайки термопомпата със захранване от подземния акумулатор или от слънчевите колектори, както и за охлаждане с термопомпения агрегат). Симулирането на описаните процеси е също от голям практически интерес;

- Съществуват различни видове ЗБТП уредби, използващи МПФС - слънчева система за битово горещо водоснабдяване със смесена уредба за акумулиране, латентни топлинни акумулатори свързани с термопомпа и слънчеви отоплителни системи, смесена отоплителна система с Възобновяеми енергийни източници (ВЕИ), комбинирана с латентен топлинен акумулатор и термопомпа и др. Заслужава вниманието да бъде изследвана ЗБТП уредба, използващи микро-капсулирани МПФС, като се наблегне предимно на симулирането;

- Системите за когенерация (СНР), произвеждащи едновременно топлина и електричество, са атрактивни в различни мащаби. Микро-когенерационни системи с фотоволтаични панели и Стърлинг двигател за локално отопление са подходящи за захранване на отделни сгради, намиращи се в селски или откъснати райони, като комбинирането на различни ВЕИ все още не е достатъчно добре проучено.

Изложените по-горе изводи от литературния обзор са валидни до момента на публикуване на представените в дисертацията резултати.

2. ЦЕЛ И ЗАДАЧИ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

В резултат на направения литературен обзор и посочените основни изводи от него е дефинирана **основната цел** на настоящия труд:

Изследване и оценяване както на различни видове смесени уредби базирани на алтернативни енергийни източници, така и на основните им компоненти.

Следните **основни задачи** се решават в дисертацията (те са различни за конкретните компоненти и уредби):

1. Вакуумен слънчев колектор с плосък абсорбер и топлинна тръба

- математическо моделиране на вакуумен колектор с плосък абсорбер и топлинна тръба;
- програмиране на математическия модел;
- извършване на симулации;
- опитни изследвания на вакуумен колектор с топлинна тръба.

2. Топлинни акумулатори

- математическо моделиране и изпитване на смесителен воден акумулатор със стратификация;
- математическо моделиране на воден акумулатор с четворна серпантина и извършване на експерименти;
- определяне на топлинните характеристики (ОТХ) на сезонни Подземни топлинни енергийни акумулатори (ПТЕА) включващо изграждане на инсталации, провеждане на експерименти, обработка на данните с различни методи, извършване на симулации;
- изследване на латентен акумулатор с парафин като материал с промяна на фазовото състояние (МПФС) включващо конструиране, изграждане, моделиране и извършване на симулации.

3. Вакуумни слънчеви колектори с воден топлоакумулатор

- експериментално изследване на инсталацията с вакуумни слънчеви колектори и воден топлоакумулатор;
- математическо моделиране;
- програмиране на математическия модел;
- сравняване на изчислените с експерименталните данни.

4. Хладилна инсталация с вградени слънчеви колектори и топлоакумулатор

- създаване на методика за пресмятане на основните топлотехнически параметри на системата;
- извършване на примерни пресмятания.

5. Подземен Вертикален топлинен енергиен акумулатор (ВТЕА) със слънчеви колектори

- конструиране и изграждане на ВТЕА инсталацията;
- експериментално изследване при зареждане и разреждане;
- извършване на симулации.

6. Фотоволтаично-топлинни (PV/T) инсталации

- конструиране на PV/T инсталации;
- провеждане на експерименти с PV/T инсталации;
- обработка на опитните резултати.

7. Земно базирана термопомпена (ЗБТП) уредба със слънчеви колектори

- конструиране на ЗБТП система със слънчеви колектори;
- създаване на методика за изследване;
- провеждане на експерименти;
- TRNSYS симулации на къща, захранвана от ЗБТП със слънчеви колектори.

8. Земно базирана термопомпена (ЗБТП) уредба използваща материали с промяна на фазовото състояние (МПФС)

- създаване на методология;
- моделиране;

Оценяване на смесени уредби с алтернативни източници на енергия

- провеждане на симулации.

9. Смесена микро-когенерационната система с фотоволтаични панели и Стърлинг двигател за локално отопление

- конструиране на експериментална уредба;

- провеждане на експерименти.

3. КОМПОНЕНТИ НА СМЕСЕНИ УРЕДБИ С АЛТЕРНАТИВНИ ЕНЕРГИЙНИ ИЗТОЧНИЦИ (АЕИ)

3.1. ВАКУУМЕН СЛЪНЧЕВ КОЛЕКТОР С ПЛОСЪК АБСОРБЕР И ТОПЛИННА ТРЪБА

3.1.1. Характеристики на вакуумен колектор с плосък абсорбер и топлинна тръба

Разглеждаме пресмятането на вакуумен слънчев колектор с топлинна тръба. Диференциалното уравнение, което е в основата на пресмятанията, важи както за плоски колектори, така и за вакуумни слънчеви колектори.

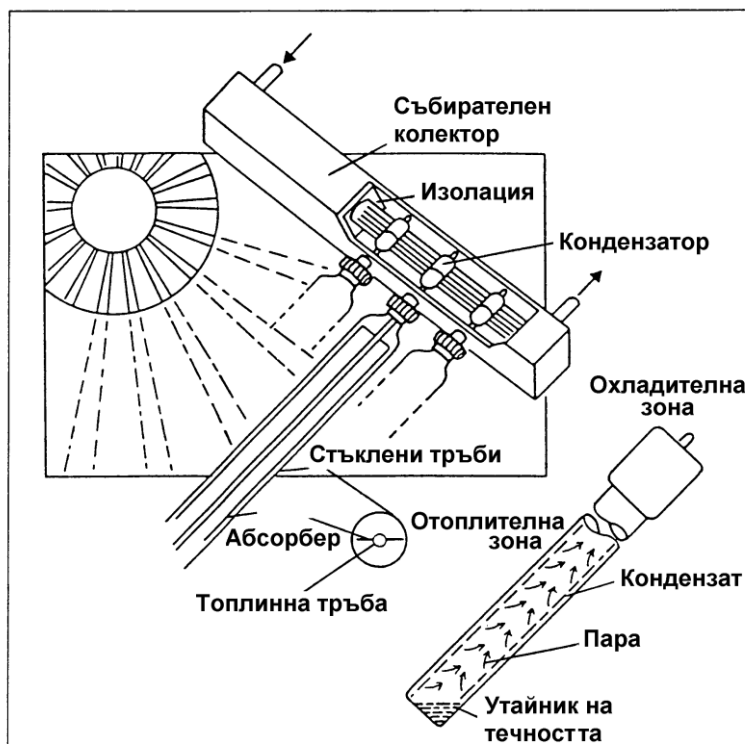
В сравнение с плосък колектор, при колектора с топлинна тръба имаме допълнителен топлообменник - кондензаторът на топлинната тръба. Освен това е сложно определянето на коефициентите на топлопредаване при кипене и кондензация в топлинната тръба. Трудности възникват и при итеративното определяне на температурата на стъклената тръба $t_{ст}$, на температурата на абсорбера $t_{аб}$ и на температурата на работния флуид в топлинната тръба $t_{рс}$.

Пресмятането на слънчевата радиация в равнината на колектора се основава на изменението на сумарната слънчева радиация $I_{хор, об}$ и на дифузната радиация $I_{хор, диф}$ върху хоризонтална равнина.

3.1.1.1. Вакуумен слънчев колектор с топлинна тръба KL VR 140

Колекторът тип KL VR 140 е пример за вакуумен слънчев колектор с топлинна тръба. Превръщането на излъчването в топлинна енергия става посредством черна абсорбираща повърхност, която се намира в стъклена тръба, от която е изтеглен въздухът. Повърхнината на абсорбера се състои от мед с нанесено селективно покритие от черен хром. Към абсорбера е заварена топлинна тръба. В тази топлинна тръба абсорбираната топлина се предава на водно/ глицеролна смес в контура на слънчевите колектори вследствие на процес на изпарение-кондензация.

Зоната на изпарение се простира до края на абсорбера. Между кондензатора и абсорбера се намира адиабатната зона. Вакуумните слънчеви колектори са събрани в модули от по 20 до 30 броя (Фиг.3.1). Кондензаторите са разположени в събирателен колектор, където се обтичат от водна/ глицеролна смес и така отдават спечелената от слънцето топлина.



Фиг.3.1. Скица на блок от вакуумни колектори

3.1.1.2. Диференциално уравнение

Балансовото уравнение за вакуумен слънчев колектор с топлинна тръба и плосък абсорбер в стъклената тръба и дифузен заден рефлектор се задава със следното уравнение:

$$(3.1) \quad C_{\text{еф}} \frac{\partial t_{\text{фл}}}{\partial \tau} + C_{\text{фл}} \cdot v_{\text{фл}} \frac{\partial t_{\text{фл}}}{\partial x} + \frac{t_{\text{фл}}}{R_{\text{об}}} = (\tau\alpha)_{\text{еф}} I_{\text{ск,об}}(\tau) + \frac{t_{\text{ок}}(\tau)}{R_{\text{об}}}.$$

Решението на това диференциално уравнение ни дава температурата на подгрятия флуид $t_{\text{фл}}$ по дължина на колекторния събирател x и във функция на времето τ . От уравнение (3.1) се вижда, че за определянето на температурата на флуида са необходими ефективният топлинен капацитет на колектора $C_{\text{еф}}$, топлинният капацитет на флуида в събирателя $C_{\text{фл}}$, на скоростта на флуида $v_{\text{фл}}$ и ефективната приведена поглъщателна способност $(\tau\alpha)_{\text{еф}}$. Освен това трябва да разполагаме с изменението на сумарната слънчева радиация в равнината на колектора $I_{\text{ск,об}}$ и на температурата на околната среда $t_{\text{ок}}$ във функция на времето τ . При всяка стъпка по времето се изчисляват $(\tau\alpha)_{\text{еф}}$ и пълното съпротивление на топлопреминаване $R_{\text{об}}$.

3.1.1.3. Примерни пресмятания с един отделен блок колектори

Изведеният математически модел е използван в компютърната програма WRVK (на програмен език FORTRAN). С помощта на

Оценяване на смесени уредби с алтернативни източници на енергия

програмата WRVK е изследван теоретично един колекторен блок произведен от фирмата Klöckner. При пресмятането са използвани техническите данни на колекторния блок. Приети са следните ъгли: ъгъл на наклона $s=45^\circ$, азимутален ъгъл на колекторния блок $\gamma = -29^\circ$ и географска ширина $\phi = 50,87^\circ$ (град Зиген, Германия). Като работен флуид в колекторния контур е избрана вода, като топлотехническите свойства са приети при температура на водата около 70°C . Тъй като информацията за работния флуид бяха съвсем общи (фамилията на алкохолите), неговите параметри бяха приети като средна стойност на няколко вида алкохол.

Стойностите на околната температура $t_{\text{ок}}$, на отражателната способност на задния рефлектор $\rho_{\text{зр}}$, на скоростта на вятъра $v_{\text{в}}$, на слънчевото лъчение в равнината на колектора $I_{\text{ск,об}}$, на поредния номер на деня на годината n , на входящата температура на флуида $t_{\text{ск,вх}}$ и на масовия дебит на колектора $\dot{m}_{\text{ск}}$ се променят при изчисленията.

Изводи към Глава 3.1.1

Беше изследван теоретически вакуумен слънчев колектор с топлинна тръба и плосък абсорбер. С помощта на създадената методика може да се пресметне изходящата температура, КПД на колектора и полезния топлинен поток на колектора при зададени стойности на входящите параметри. Следните изводи могат да се направят на базата на извършените изчисления на някои параметри на колекторите с компютърната програма WRVK:

- Изборът на отражател зад колекторите е много важен - разлика от 0,7 при отражателната способност на задния отражател води до вариране на КПД с 8 до 10%;

- КПД спада при по-високи стойности на сумарната слънчева радиация за по-големи стойности на комплексния фактор;

- При високи температурни разлики КПД спада по отношение на по-ниска сумарна слънчева радиация;

- Сравнително високите стойности на КПД при високи температурни разлики позволяват ефективното използване на този вид колектор при достигане на високи температури на соловия разтвор;

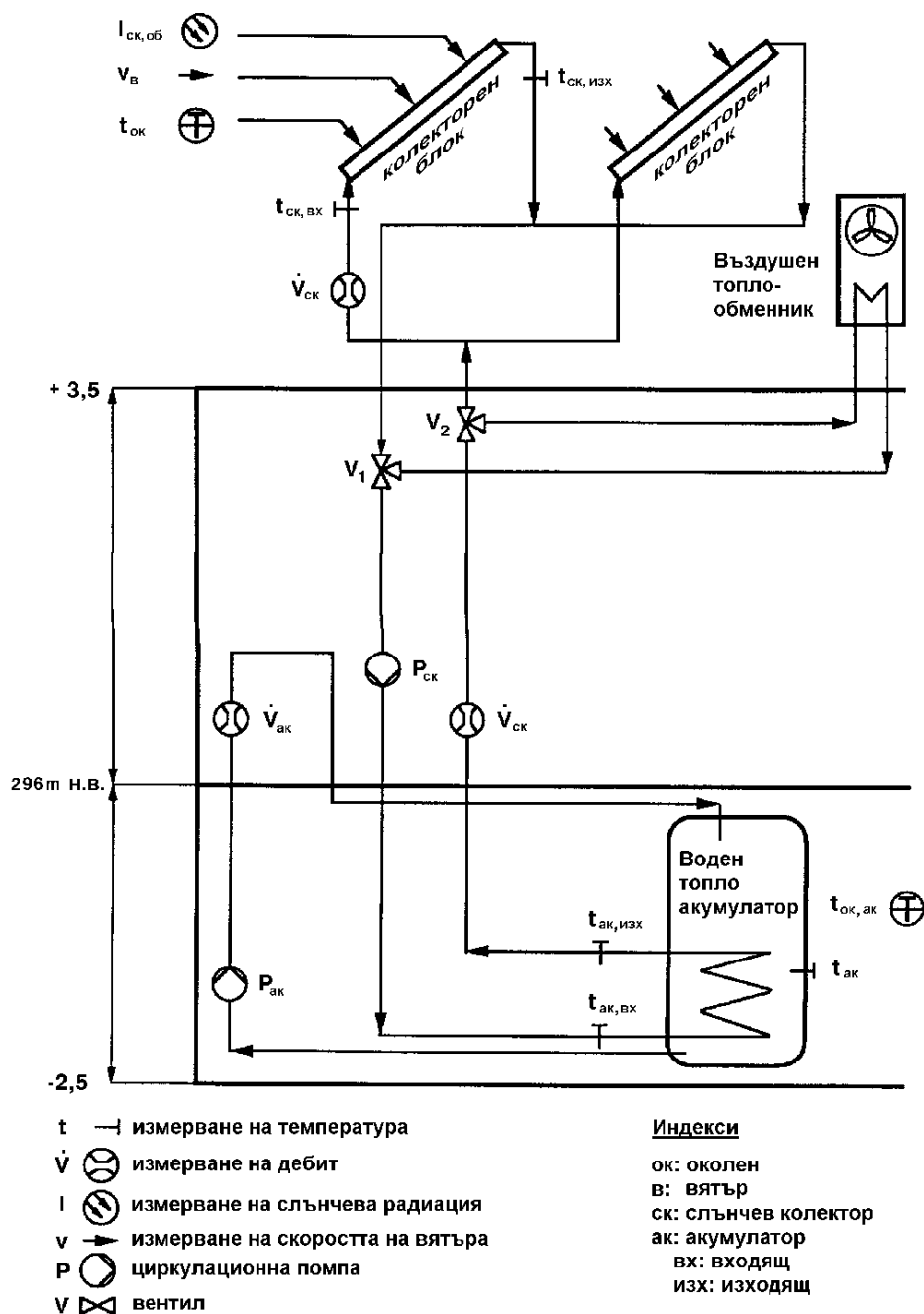
- КПД при по-висока сумарна слънчева радиация се увеличава с повишаване на масовия дебит на флуида;

- Плътноста на полезния топлинен поток се повишава със спадане на разликата от входящата и околна температури $(t_{\text{ск,вх}} - t_{\text{ок}})$ и при нарастваща сумарна радиация;

- Плътноста на обемния дебит $\dot{v}_{\text{ск}}$ спада с нарастващи разлики от изходящата и входяща температури $(t_{\text{ск,изх}} - t_{\text{ск,вх}})$ и намаляваща сумарна радиация $I_{\text{ск,об}}$.

3.1.2. Експериментално изследване на вакуумен колектор с топлинна тръба

Направено бе експериментално изследване на вакуумен колектор с топлинна тръба. При изследването не беше използван активният експеримент, тъй като колекторите бяха изследвани естествено, при което възможните дни за измерване не бяха достатъчни. Въпреки това експерименталните резултати бяха използвани за създаването на статистически модели, които описват КПД на колектора $\eta_{ск}$ и плътността на полезния топлинен поток $\dot{q}_{ск}$.



Фиг.3.2. Опитна структура и технически план на измерване на инсталацията “вакуумни слънчеви колектори - воден топлоакумулатор”

Оценяване на смесени уредби с алтернативни източници на енергия

При експеримента бяха измервани входящата $t_{\text{ск,вх}}$ и изходящата $t_{\text{ск,изх}}$ температура, обемният дебит на отделен блок от колектори $\dot{V}_{\text{ск}}$ (30 вакуумни слънчеви колектори) и метеорологичните величини - околна температура $t_{\text{ок}}$, скорост на вятъра $v_{\text{в}}$ и сумарната слънчева радиация в равнината на колектора $I_{\text{ск,об}}$ (Фиг.3.2).

На базата на наличните експериментални резултати бяха създадени няколко статистически модела. Първият модел (3.2) представя КПД на колектора $\eta_{\text{ск}}$ във функция от комплексния фактор $K = (t_{\text{ск,вх}} - t_{\text{ок}}) / I_{\text{ск,об}}$ при различна сумарна слънчева радиация $I_{\text{ск,об}}$ в равнината на колектора.

$$(3.2) \quad \eta_{\text{ск}} = -0,31852 + 1,0195 \cdot K + 0,31795 \cdot 10^{-2} \cdot I_{\text{ск,об}} - 0,78993 \cdot 10^{-2} \cdot K \cdot I_{\text{ск,об}} + 1,815 \cdot K^2 - 0,22685 \cdot 10^{-5} \cdot I_{\text{ск,об}}^2.$$

Следващият статистически модел (3.3) представя КПД на колектора $\eta_{\text{ск}}$ във функция на температурната разлика $\Delta t = (t_{\text{ск,вх}} - t_{\text{ок}})$ при различна сумарна слънчева радиация в равнината на колектора.

$$(3.3) \quad \eta_{\text{ск}} = 0,055933 - 0,96751 \cdot 10^{-2} \cdot \Delta t + 0,15987 \cdot 10^{-2} \cdot I_{\text{ск,об}} - 0,81596 \cdot 10^{-5} \cdot \Delta t \cdot I_{\text{ск,об}} + 0,13228 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta t^2 - 0,63772 \cdot 10^{-6} \cdot I_{\text{ск,об}}^2.$$

КПД на колектора $\eta_{\text{ск}}$ е във функция на сумарната слънчева радиация в равнината на колектора $I_{\text{ск,об}}$ при три различни дебита $\dot{m}_{\text{ск}}$:

$$(3.4) \quad \eta_{\text{ск}} = -0,12506 - 1,187 \cdot \dot{m}_{\text{ск}} + 0,18257 \cdot 10^{-2} \cdot I_{\text{ск,об}} + 0,24746 \cdot 10^{-2} \cdot \dot{m}_{\text{ск}} \cdot I_{\text{ск,об}} + 9,8986 \cdot \dot{m}_{\text{ск}}^2 - 0,12308 \cdot 10^{-5} \cdot I_{\text{ск,об}}^2.$$

Последният модел (3.5) ни дава зависимостта между плътността на полезния топлинен поток $\dot{q}_{\text{ск}}$ и сумарната слънчева радиация в равнината на колектора $I_{\text{ск,об}}$ при различни температурни разлики $\Delta t = (t_{\text{ск,вх}} - t_{\text{ок}})$.

$$(3.5) \quad \dot{q}_{\text{ск}} = -89,581 - 1,6968 \cdot \Delta t + 0,76553 \cdot I_{\text{ск,об}} - 0,93025 \cdot 10^{-2} \cdot \Delta t \cdot I_{\text{ск,об}} + 0,54337 \cdot 10^{-1} \cdot \Delta t^2 + 0,24139 \cdot 10^{-3} \cdot I_{\text{ск,об}}^2.$$

Факторите, които участват в уравненията (3.2 до 3.5) се намират в следния обхват:

$$K \in [0,01; 0,15] \text{ m}^2\text{K/W};$$

$$I_{\text{ск,об}} \in [200; 900] \text{ W/m}^2;$$

$$\Delta t \in [5; 60] \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\dot{m}_{\text{ск}} \in [0,01; 0,11] \text{ kg/s}.$$

Изводи към Глава 3.1.2

Бяха създадени 4 статистически модела, описващи вакуумен слънчев колектор с топлинна тръба и плосък абсорбер, изследван експериментално. Следните заключения могат да се направят от получените данни:

- Този вид слънчеви колектори могат да се използват при високи температури - при температурна разлика $\Delta t = (t_{\text{ск,вх}} - t_{\text{ок}}) = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ все още имаме КПД на колектора $\eta_{\text{ск}} = 0,5$ (при $I_{\text{ск,об}} = 700 \text{ W/m}^2$);

- При по-голям дебит $\dot{m}_{\text{ск}}$ се повишава КПД на колектора.

3.2. ТОПЛИННИ АКУМУЛАТОРИ

3.2.1. Смесителен воден акумулатор със стратификация

За пресмятане на температурата на флуида в отделните слоеве на смесителен воден акумулатор със стратификация е създаден програмен блок АКИМ на алгоритмичен език FORTRAN-77. В основата му е залегнал модел от обикновени диференциални уравнения.

При изпълнението на програмата се задават следните входни данни:

1. Конструктивни:

- дебелина на изолационния слой - 0,1 m;
- брой на слоевете - 10;
- обем на акумулатора - 0,32 m³;
- пълна повърхност на акумулатора - 2,93 m².

2. Топлотехнически (коэффициент на топлопроводност):

- при първия опит – 0,630 W/mK;
- при втория опит – 0,615 W/mK.

3. Масови дебители на флуида през акумулатора от страната на зареждане и зареждане:

- при първи опит - 0,79 kg/s;
- при втори опит - 0,96 kg/s.

4. Начална температура на флуида в слоевете на акумулатора: 18 °C;

5. Начална температура на околната среда:

- при първия опит - 22 °C;
- при втория опит - 20 °C.

Като резултат от действието на програмата се получават температурите на флуида в различните слоеве на акумулатора в произволен момент от времето, както и температурите на входа на акумулатора. За решаване на системата от диференциални уравнения е използвана стандартната подпрограма DVERK от пакета ISML.

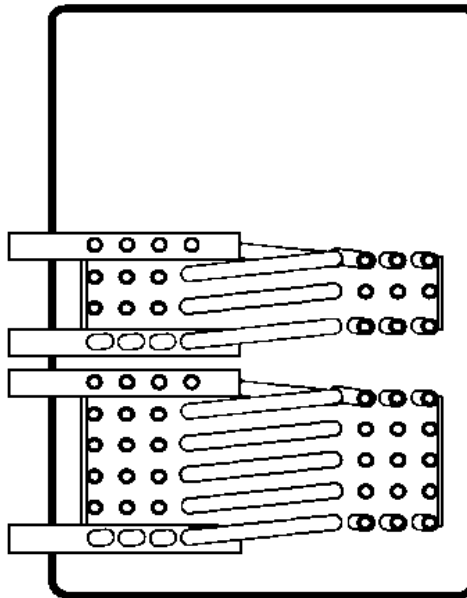
Проверката на достоверността на модела е направена с помощта на натурални експерименти на воден смесителен акумулатор АВ-320, включен в структурната схема на енергопреобразуваща система слънчеви колектори - термопомпа - консуматор.

Изводи към Глава 3.2.1

Използването на програмния блок АКИМ, базиран на верифицирания математически модел, позволява да се симулират процесите в течностни смесителни акумулатори с различна големина когато отсъстват експериментални данни. Броят на зададените пластове може да бъде произволен. Получените резултати ще съответстват с достатъчна достоверност на действителните.

3.2.2. Воден акумулатор с четворна серпантина

Акумулаторът тип „TBS-Isocal“ SEB 600 е един пример за воден топлоакумулатор с четворна серпантина. Акумулаторът се състои от изолиран, вертикално разположен цилиндричен резервоар съдържащ две топлообменни серпентини.



Фиг.3.3. Схема на топлинен акумулатор с четворна серпантина

Създадена е подробна методика за математическото описание на воден топлоакумулатор. Две диференциални уравнения описват изменението на изходящата температура на флуида от серпентината и на температурата на работния флуид в акумулатора във функция на времето τ . Решението на диференциалните уравнения води до определяне на тези две температури.

Енергийният баланс за хомогенен акумулатор без стратификация (Фиг.3.3) се задава със следното уравнение (ако се пренебрегне топлообменът от горния към долния слой):

$$(3.6) \quad \frac{\partial(m_{\text{ак}} \cdot h_{\text{ак}})}{\partial \tau} = \dot{Q}_{\text{ак}} + \dot{Q}_{\text{ст}} + \dot{Q}_{\text{тр}},$$

където $\dot{Q}_{ст}$ и $\dot{Q}_{тр}$ са изходящи, а $\dot{Q}_{ак}$ е входящ топлинен поток за акумулатора;

$m_{ак}$ - маса на флуида в акумулатора, kg;

$h_{ак}$ - специфична енталпия на флуида в акумулатора, J/kg;

Беше създадена компютърната програма "Speicher" на Fortran-77, с цел да се опишат протичащите процеси в акумулатора. С тази програма бяха направени изчисления за определяне на изходящата температура на соловия разтвор от акумулатора $t_{ак,изх}$ и на температурата на флуида в акумулатора $t_{ак}$. След това пресметнатите стойности бяха сравнени с експерименталните резултати за 13.10.1992.

Пресмятанията, направени с модела, са сравнени с експерименталните резултати на същия акумулатор. Сравненията показват добро съвпадение.

Изводи към Глава 3.2.2

Изходящата температурата на флуида от акумулатора $t_{ак,изх}$ и температурата на флуида в акумулатора $t_{ак}$ могат да бъдат пресметнати с помощта на представената методика ако са налични стойности на входящата температурата на флуида в акумулатора $t_{ак,вх}$.

Налагат се следните изводи от изследването:

- Пресмятането на температурата на флуида в акумулатора $t_{ак}$ и на изходящата температурата на флуида от акумулатора $t_{ак,изх}$ в течение на времето с компютърния блок „Speicher“ показва добро съвпадение на изчисленияте и измерени стойности;

- Предложеният модел е валиден за акумулатори с четворна серпентина с възможност да се използват и други работни среди.

3.2.3. Определяне на топлинни характеристики (ОТХ) на сезонни Подземни топлинни енергийни акумулатори (ПТЕА)

3.2.3.1. Инсталации за ОТХ

3.2.3.1.1. Изградена стационарна инсталация в Чили

Уредбата беше изградена на територията на „Лабораторията по слънчева енергия“ на Техническият университет Федерико Санта Мария (UTFSM) в град Quilque, Чили. Схемата е показана на Фиг.3.4.

През 2002 г. бяха направени на една линия три отвора до дълбочина около 22m. Почвата се състои от 3 основни слоя. Централният отвор е сондаж с дълбочина 16,9 m и диаметър 15 cm. Впоследствие сондажът се фугира с 12% бентонитова смес (търговска марка Max Gel, произведена във Federal Summit, Houston, Texas). В центъра на Вертикалния топлообменник (ВТО) бяха монтирани 4 термодвойки тип К (Хромел/Алумел) на следните дълбочини - 16,9 m, 10,7 m, 3,24 m и 0,25 m. Още два допълнителни отвора бяха направени както следва - едната на 0,4 m вляво

3.2.3.1.3. Мобилна уредба с термпомпа за провеждане на ОТХ в Испания

Разработени са два различни метода: един с използване на електрически нагревателни елементи и друг с използване на реверсивна термпомпа (тук може да се подвежда и отвежда топлина към/ от земята).

Мобилната ОТХ инсталация, реализирана в Политехническият университет във Валенсия (UPV), съдържа реверсивна термпомпа – тя е ново поколение при внедряването на ОТХ като може да работи както в режими на отопление (извличане на енергия от земята), така и в охлаждане (инжектиране на енергия към земята).

Изводи към Глава 3.2.3.1.3

Представена беше механичната част и контролната система от опитна платформа за провеждане на ОТХ тест, базирана на концепцията на Henk Witte от компанията Holland Groenholland. Можем да направим следните основни изводи след извършената работа:

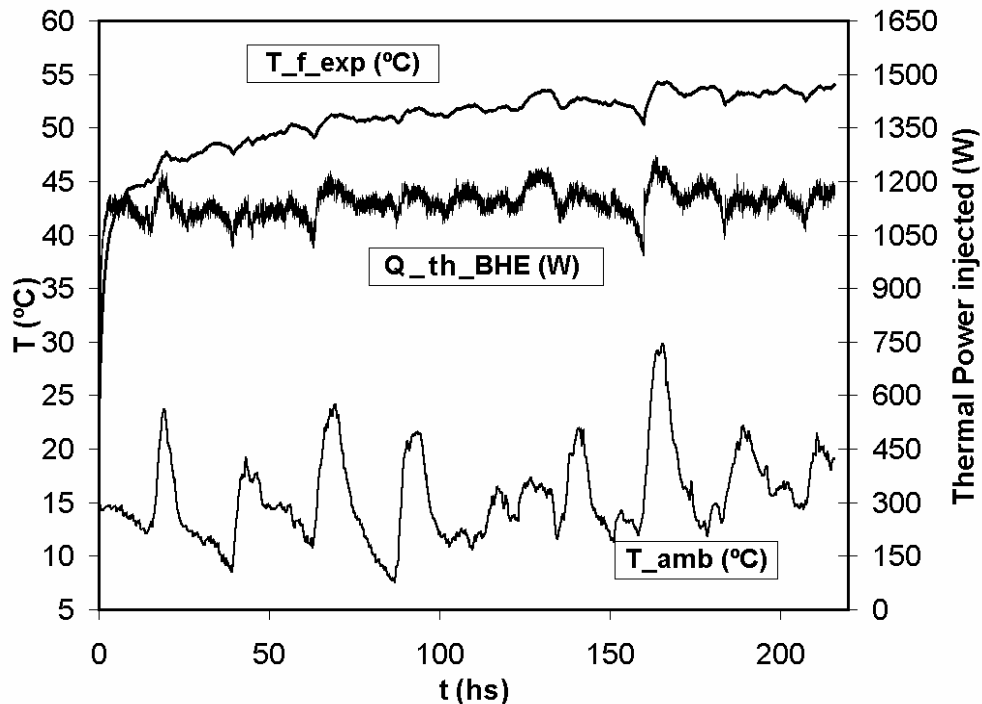
- Основната разлика спрямо повечето други системи е, че описаната тук експериментална апаратура поддържа фиксирана температурна разлика между входа и изхода на ВТО;
- Учени от някои страни (например Швеция), които са използвали преди инсталация с електрически нагревател, предпочитат и са построили по-късно (през 2004г.) мобилна опитна платформа с термпомпа;
- Моделът на линейния източник (МЛИ), който е лесен и удобен метод за оценка на топлинните свойства на земята се нуждае от много стабилна топлинна мощност, подведена към ВТО (в случая осигурена от гореописаната опитна платформа).

3.2.3.2. Експерименти за Определяне на топлинни характеристики (ОТХ)

3.2.3.2.1. ОТХ тест, проведен в Чили

Тестът за Определяне на топлинни характеристики (ОТХ) е проведен в продължение на 9 дни (от 24 юни до 3 юли 2003г.) с инсталацията, изградена в Quilrue, Чили (Фиг.3.4). Измерените температури са - околната температура, температурата на входа и изхода на Вертикалния топлообменник (ВТО). Освен това, въпреки че дебитът бе фиксиран при постоянна стойност от 3,17 l/min, той периодично бе измерван и контролиран. Електрическата мощност беше регулирана и поддържана постоянна на около 1000 W. Електрическата мощност на помпата беше около 350 W.

Фиг.3.6. изобразява изменението на променливите, разглеждани при оценката на данните, във функция на времето. Ясно се виждат колебанията при подведената топлинна мощност. Някои от основните показани характеристики съответстват на колебанията на температурата на околната среда по начин, който се нарича „свързване с околната среда“.



Фиг.3.6. Изменение на променливите в системата (показани са само тези, взети предвид при оценката на данните)

3.2.3.2.2. ОТХ тестове, проведени в България

На територията на ТУ - София, филиал Пловдив са изградени няколко различни ВТО. Дворът на блок 3 на Техническия университет в София, филиал Пловдив е избран за първо тестово място. Един отвор с диаметър 180 mm беше направена на дълбочина 42 m през ноември 2008 г.

Първият ОТХ, с продължителност 10 дни, беше проведен от 11 до 21 януари 2009. Измерените параметри бяха температурата на околната среда, температурите на входящия и изходящия флуид на ВТО и температурите на ВТО на различни дълбочини. Дебитът се измерва и контролира при постоянна стойност от 6,45 l/min. Електрическата мощност беше регулирана и поддържана постоянна на около 1500 W. Електрическата мощност на циркулационната помпа беше около 100 W. Налягането на водата в инсталацията се поддържаше около $2,2 \cdot 10^5$ Pa. Измерванията се извършваха на всеки 60 s. Средната незасегната температура на земята $T_{0,m}$ се определя чрез изпомпване на флуида на топлоносителя от сондажните тръби и измерване на изходящата температура за време от 10 s. $T_{0,m}$ след това се изчислява като средната стойност на измерваните температури. В представените експерименти е установено, че $T_{0,m}$ е 16,3 °C.

Всички данни се контролират автоматично от специално проектирана система за управление, инсталирана на лабораторното ремарке. Системата е напълно автоматична и съхранява всички измерени данни в текстови файлове. Поддържането на постоянен топлинен поток при експериментите се постига чрез постоянен честотен контрол на помпата и котела.

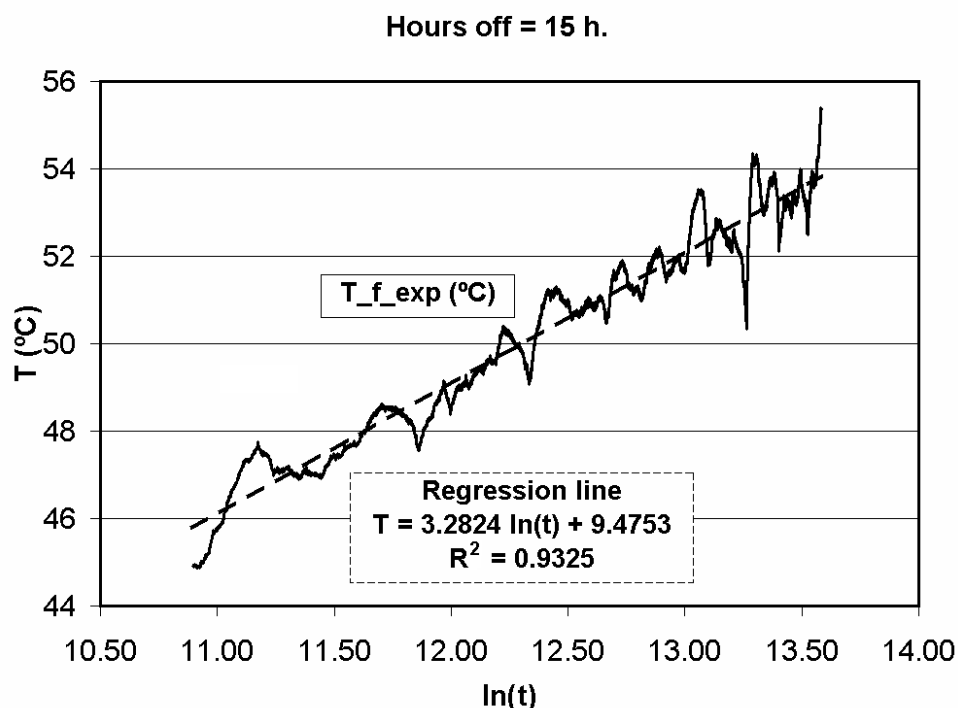
3.2.3.2.3. Създаване на кадастрална схема в различни местонахождения в България

Идеята на екипа под ръководството на проф. Александър Георгиев от ТУ София, филиал Пловдив е да подготви кадастър на наземните термични свойства в България. Поради геоложката структура могат да се получат различни стойности на различните места. Трябва да се извършат най-малко 28 ОТХ теста (в България има 27 регионални центъра с население между 60 00 и 400 000 граждани). Допълнително трябва да се направят още ОТХ само в столицата София, която има около 2 милиона граждани. Средните стойности на топлинните параметри, събрани в кадастъра на наземни термични свойства, ще помогнат на специалистите в областта при подготовката на съответните геотермални проекти.

3.2.3.3. Методи за обработка на данните при ОТХ

3.2.3.3.1. Метод на линейния източник (МЛИ)

„Методът на линейния източник“ е най-често използваният метод за оценка на ОТХ. По-долу представяме оценката на няколко теста, проведени в различни страни.



Фиг.3.7. Логаритмична зависимост на средната температура от времето

Оценка на ОТХ в Чили

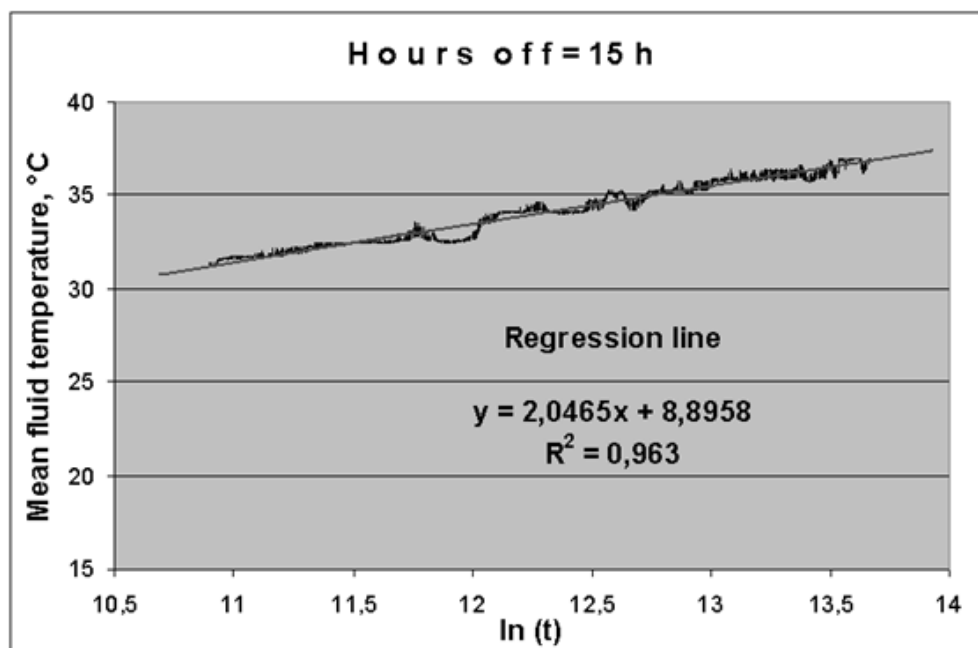
Топлопроводността е свързана с наклона на получената линия в логаритмичен график за време на средната температура на флуида във ВТО (Фиг.3.7). Резултатните стойности за топлопроводността на земята и термичното съпротивление на ВТО са съответно 1,8 W/mK и 0,3 mK/W.

Оценка на ОТХ в България

Начална точка и продължителност на анализа на експеримента.

Обикновено данните, съответстващи на първите 7 до 24 часа експеримент, не се вземат предвид при анализа. Фиг.3.8 (блок 3, ТУ София, филиал Пловдив) показва средната температура от логаритмичната зависимост на времето, както и наклона на свързаната регресионна линия (приетата начална точка е 15h).

Топлопроводността λ е свързана с наклона на получената линия. Получените стойности по време на изпитванията за λ са 1,38 W/mK, а за R_b - 0,314 mK/W (блок 3).

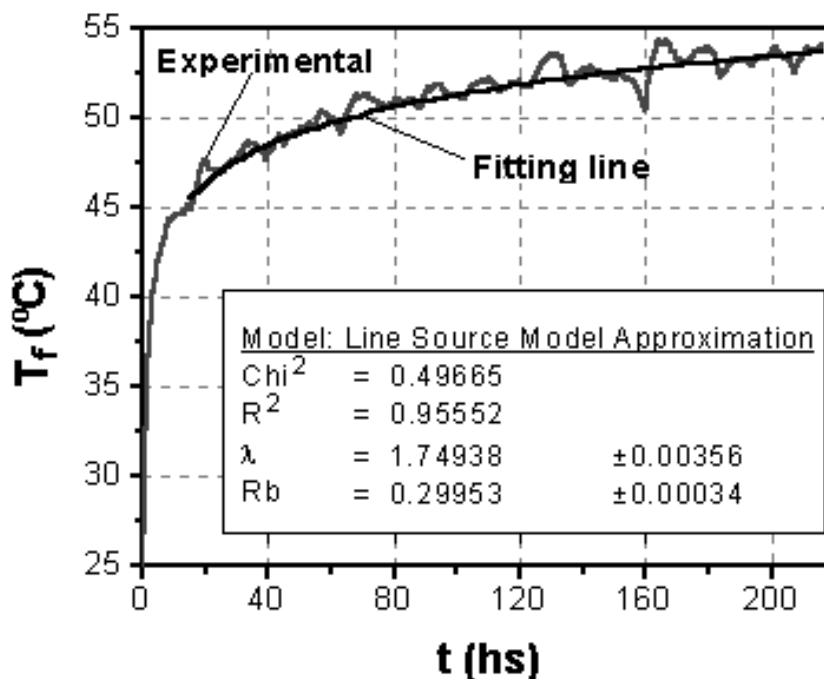


Фиг.3.8. Логаритмична зависимост от времето за цялата продължителност на теста (без първите 15 h)

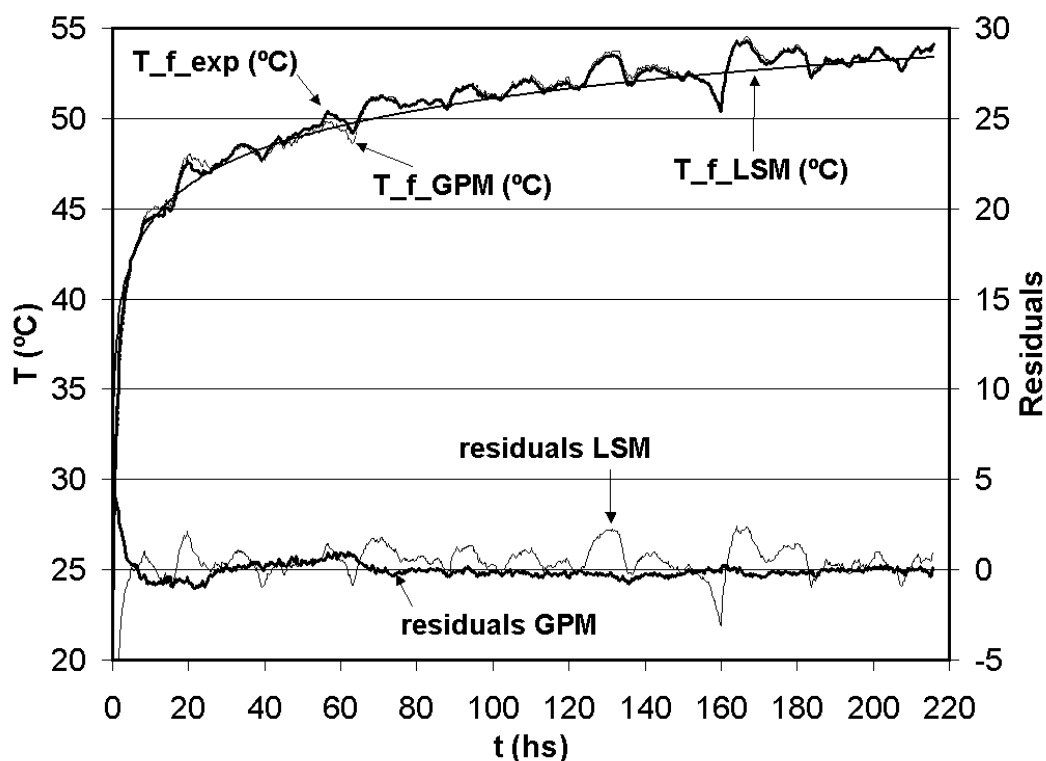
Направено е сравнение с резултатите от различни експерименти, проведени другаде по света. То показва, че стойностите на топлопроводността и термично съпротивление на ВТО, получени от тестове в Пловдив са сравними със стойностите, получени от другите тестове.

3.2.3.3.2. Метод „Параметър с две променливи (ПДП)“

При оценка на експеримента в Чили бе използван метода „Параметъра с две променливи“. На Фиг.3.9 е представена графично получената апроксимирана нелинейна крива, наложена върху опитните данни (Chi^2 се определя като сума от квадратите на отклоненията на теоретичната крива от експерименталните точки). На същата фигура е представено обобщение на резултатите със стойностите на двата променливи параметъра, а именно $\lambda = 1,749$ W/mK и $R_b = 0,299$ mK/W.



Фиг.3.9. Данни получени при използване на метода „Параметър с две променливи“



Фиг.3.10. Отклик, получен въз основа на λ и R_b използвайки програмата ИГС и МЛИ

3.2.3.3.3. Метод „Измерване на геотермални свойства (ИГС)“

При оценка на експеримента в Чили бе използван и трети метод, т. нар. „Измерване на геотермални свойства“. Резултатите от анализа с помощта на софтуера ИГС са представени на Фиг.3.10. Представена е

Оценяване на смесени уредби с алтернативни източници на енергия

средната температура на флуида, предвидена от МЛИ. Поради преходния характер на модела, целият набор от данни се използва в анализа. Остатъците (абсолютни грешки) между прогнози и експериментални точки са показани в долната част на графиката със стойности на ИГС много близки до нулата. Относително големи абсолютни грешки могат да се наблюдават по време на ранните етапи на теста (между 0 - 10 часа), вероятно поради разликите между реалния тест и данните, предвидени от модела. Като резултат се получават следните стойности за топлопроводността и термичното съпротивление на ВТО - 2,35 W/mK и 0,32 W/mK.

Стойностите на топлопроводността на земята λ и термичното съпротивление на ВТО R_b , получени въз основа на трите метода „Линеен източник“, „Параметър с две променливи“ и „Измерване на геотермални свойства“, са сравнени въз основа на данните, получени при ОТХ в Чили резултатите и са представено в Таблица 3.1.

Табл.3.1. Сравнение между резултатите, получени при различни методи за оценка

| Метод на оценяване | λ , W/mK | R_b , mK/ W |
|-----------------------------------|------------------|---------------|
| Линеен източник | 1,8 | 0,3 |
| Параметър с две променливи | 1,749 | 0,299 |
| Измерване на геотермални свойства | 2,35 | 0,32 |

Изводи към Глава 3.2.3.3.1-3.2.3.3.3 (ОТХ в Чили)

Въз основа на описаните по-горе резултати правим следните изводи:

- Ефективните стойности от 1,8 W/mK и 0,3 mK/W бяха определени за топлопроводността и съответно за термичното съпротивление на ВТО;
- Прилагането на класическия МЛИ метод и/или настройка при метода „Параметър с две променливи (ПДП)“ може да се използва като бърз и надежден инструмент за оценка на данните;
- Точността на оценката зависи от прецизността при извършване на теста. Важни аспекти са надеждните измервания на температурата, постоянно електрозахранване, правилно определяне на недокоснатата подземна температура и наличие на възможно най-устойчива на атмосферните влияния система;
- Стойността на топлопроводността се оказва доста нечувствителна към началната точка на отчитане.

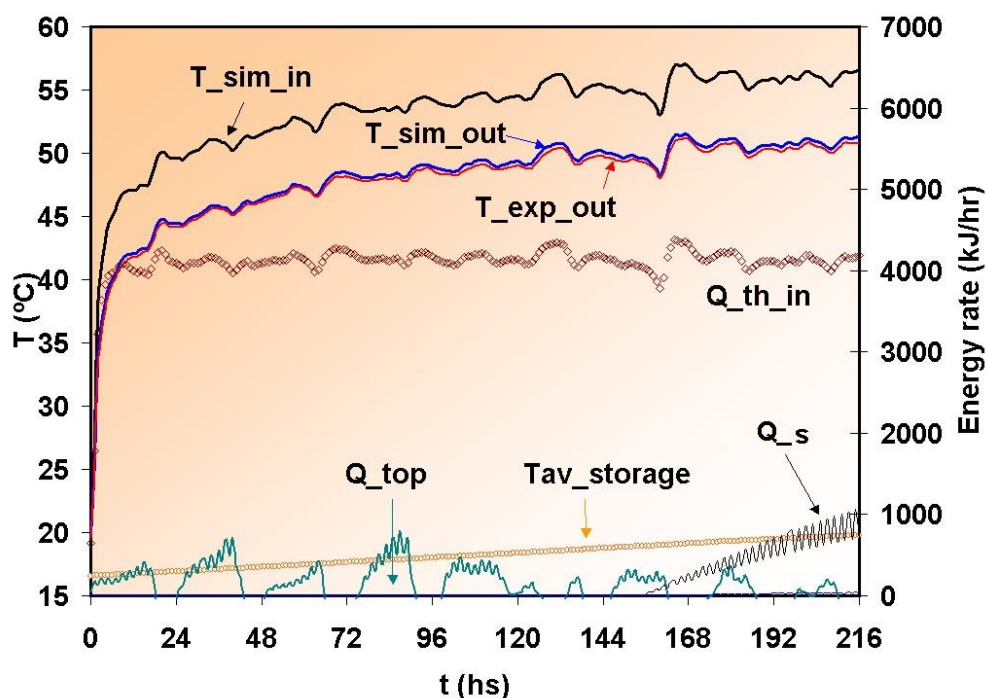
3.2.3.4. Симулации на ОТХ тестове

3.2.3.4.1. Симулации на ОТХ в Чили с програма TRNSYS

ОТХ тестът е проучен с помощта на TRNSYS ТИП 141 ВЕРТИКАЛЕН ЗЕМЕН ТОПЛООБМЕННИК. Тази подпрограма моделира

вертикален топлообменник (ВТО), който взаимодейства топлинно със земята. Програмата предполага, че ВТО са разположени равномерно в подземен цилиндричен акумулатор. В тръбите има конвективен топлообмен, а топлообменът към обема на акумулатора се осъществява чрез топлопроводност. За конкретния случай (на само един ВТО), обемът на акумулатора се определя като цилиндър с радиус 1 m и дълбочина, равна на тази на действителния ВТО. ТИП 141 позволява разглеждане на няколко приземни слоя, но в случая за симулация е приет само един слой.

В програмата се задават измерените стойности на входящата и изходящата температури на флуида към/ от ВТО, както и температурата на околната среда. Изходящата температура на флуида е използвана за сравнение с прогнозираната изходяща температура при графично представяне на данните. Фиг.3.11 представя резултатите от симулацията с TRNSYS. Съпадението между експерименталната и симулираната с TRNSYS изходяща температура е явно. Графиката показва също енергийните скорости през границите на зоната за акумулиране и изменението на средната температура на акумулатора.



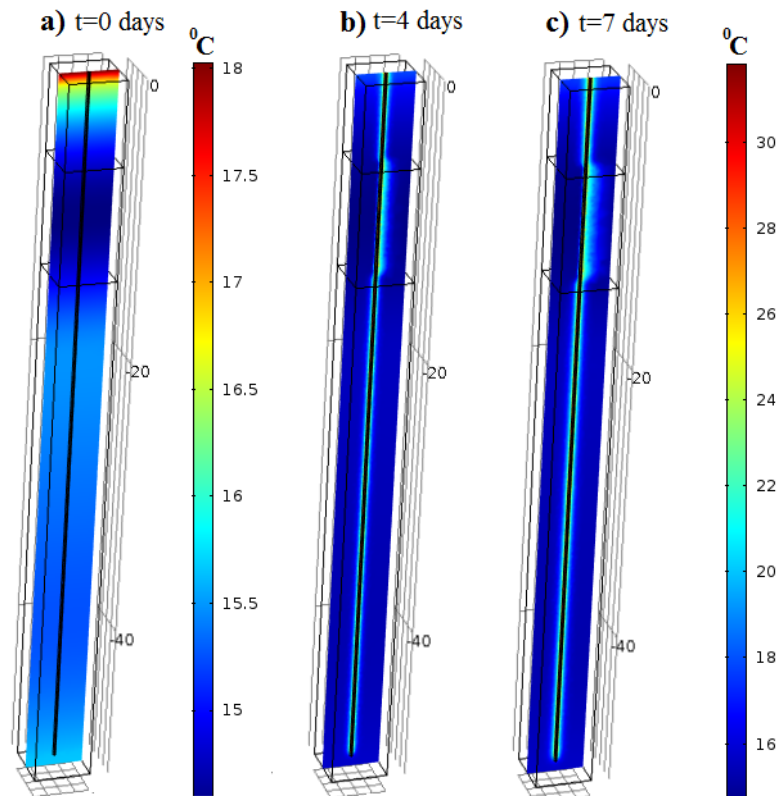
Фиг.3.11. Сравнение на опитни данни със симулации направени с TRNSYS ТИП 141

3.2.3.4.2. Числени симулации на ОТХ в България

Въз основа на резултатите от числената симулация, която е по-надежден инструмент в сравнение с аналитичните методи, е възможно да се оцени температурното поле около ВТО (Фиг.3.12). Освен това, цифровият модел отчита лесно различни скорости на подаване на топлина, като отразява температурата на водата на входа на ВТО, за да симулира процеса (например зареждане или разреждане на подземния вертикален

Оценяване на смесени уредби с алтернативни източници на енергия

акумулатор за желана продължителност от време). Освен това броят на ВТО може да бъде увеличен до желания брой в зависимост от топлинните нужди на потребителите, като по този начин се създава мащабно съхранение на топлинна енергия в подземния акумулатор.

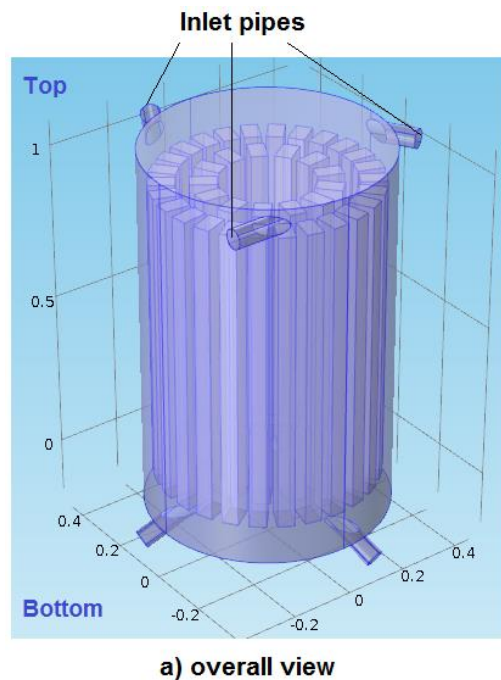


Фиг.3.12. Разпределение на температурата в а) началото, б) след 4 дни и в) след 7 дни при симулацията на ОТХ

3.2.4. Латентен топлинен акумулатор (ЛТА) с материали с промяна на фазовото състояние (МПФС)

3.2.4.1. Конструкция на акумулатор с МПФС

Проф. Александър Георгиев и неговият екип от ТУ - София, филиал Пловдив проектираха и разработиха латентен топлинен акумулатор, чиито конструктивните характеристики са показани подробно на Фиг.3.13. Контейнерите с МПФС имат правоъгълно напречно сечение с размери 950 x 80 x 50 mm. Те се поставят във вертикалния акумулатор с формата на цилиндър, който е с височина 1m и радиус 0,3 m. Акумулаторът и контейнерите са изработени от неръждаема стомана клас AISI 304L. Броят на контейнерите е 39 като са разположени коаксиално в акумулатора. Налице са два концентрични кръга: външният кръг съдържа 26 контейнера, а вътрешният кръг има 13 контейнера. Всички контейнери са фиксирани със скоби към долната и горната част на акумулатор, за да бъдат стабилни по време на режими на зареждане и разреждане. В горната страна на акумулатора има три входящи тръби, където се подава работният флуид. В основата на акумулатора има други три тръби, през които се отвежда работният флуид. Акумулаторът е изолиран отвън със стъклена вата.



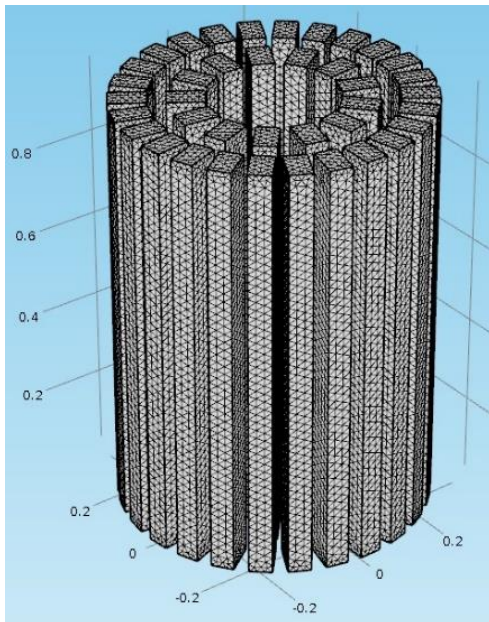
Фиг.3.13. Конструкция на латентния топлоакумулатор

Като МПФС за латентното акумулиране на топлина се използва парафин. Той се счита за ефективен материал за съхранение на топлина поради голямата си латентна топлина на топене (200 kJ/kg или 150 MJ/m^3), термична стабилност, незначително преохлаждане, нетоксичен и ниска цена. Подборът за конкретна инсталация зависи предимно от следните им основни свойства: плътност, kg/m^3 ; температура на топене, $^{\circ}\text{C}$; специфичен топлинен капацитет, J/kgK ; специфична латентна топлина на топене, kJ/kg ; топлопроводност, W/mK и промяна на обема, %.

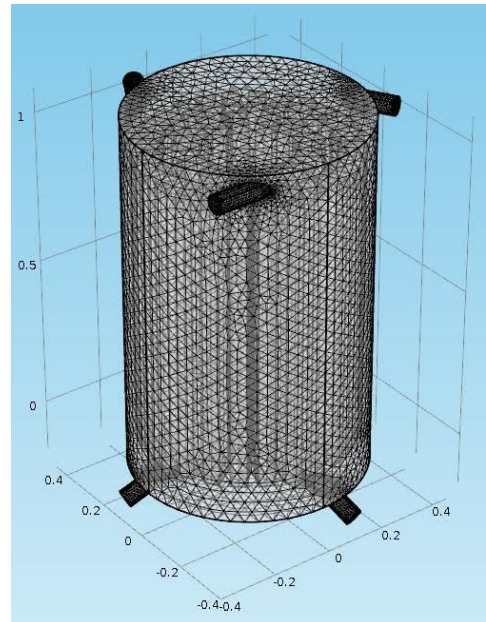
3.2.4.2. Числено моделиране на акумулатор с МПФС

3.2.4.2.1. Числено моделиране на ЛТА чрез метод на крайни елементи, базиран на мултифизиката на Comsol

Симулацията се провежда в триизмерно пространство във функция на времето, чрез метод на крайни елементи, базиран на мултифизиката на Comsol. Геометрията, използвана за извършване на симулация на зареждане и разреждане на латентен топлоакумулатор (ЛТА), е представена на Фиг.3.13. Контейнерите, съдържащи МПФС (например парафини), са топлоизолирани отгоре и отдолу. Освен това се приема, че обемът на МПФС не се променя по време на фазовия преход. Това предположение позволява да се въведат по-прости математически модели, въпреки че според експерименталните изследвания парафините променят обема си по време на стапяне или втвърдяване. Освен това, за да се избегнат интензивни числени изчисления, контейнерите се считат за високо проводими слоеве. Мрежата на контейнерите с МПФС е показана на Фиг.3.14, а Фиг.3.15 показва мрежата на свързване на акумулатора с контейнерите.



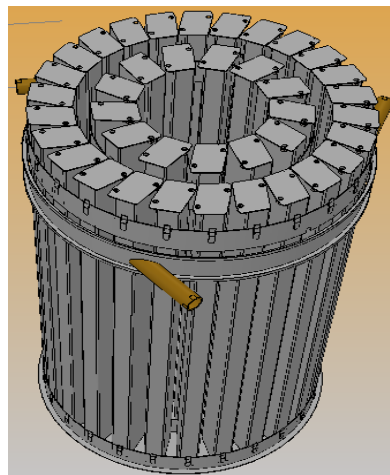
Фиг.3.14. Мрежа на контейнерите с МПФС



Фиг.3.15. Мрежа на латентния топлоакумулатор

3.2.4.2.2. Числено моделиране на ЛТА чрез техниката на енталпийната поръзност, използвана в ANSYS Fluent

Това моделиране цели разработване на бърз числен метод за прогнозиране на топлинното поведение на МПФС, затворен в контейнер със специфична геометрия, проектиран като активен елемент от изпитателния топлоакумулатор в Технически университет София, филиал Пловдив (Фиг.3.16). Като работен флуид се използва вода, която се подава от три тангенциални входящи тръби в горната част на резервоара и излиза от три тангенциални изходящи тръби на дъното. Това устройство е част от експериментална топлинна слънчева инсталация за акумулиране на топлина. Типичната входяща температура на работния флуид е 65°C (от слънчевия колектор) в режим на зареждане и 15°C (вода от мрежата) в режим на разреждане.



Фиг.3.16. Вътрешна конструкция на латентен топлоакумулатор като част от експериментална слънчева топлинна инсталация

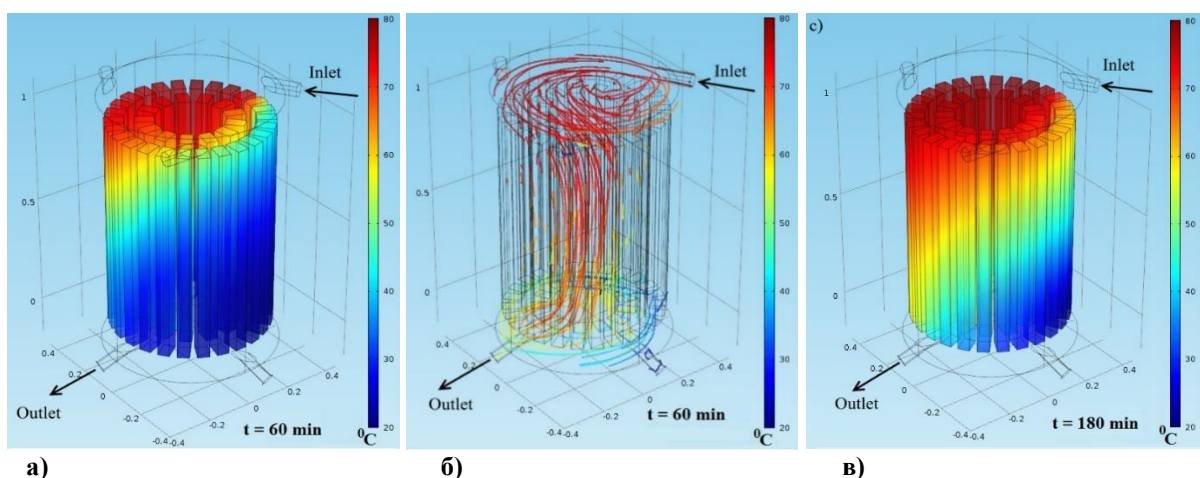
Цел на числената симулация е да се оцени не само физическия експеримент, но и ефекта върху процеса на промяна на фазата на следните фактори: външна температура, коефициент на конвекция на работния флуид и естествена конвекция вътре в контейнера.

3.2.4.3. Симулиране на акумулатор с МПФС

3.2.4.3.1. Симулиране на ЛТА чрез метод на крайни елементи, базиран на мултифизиката на Comsol

Проведени са триизмерни преходни симулации на топлопренасяне с промяна на фазата. Продължителността както на симулациите на зареждане, така и на разреждане продължава три часа, тъй като това е достатъчно да се извърши анализ на топлопренасянето в акумулатора.

На Фиг.3.17 резултатите от симулацията са илюстрирани за случая **a**, където само една входяща и една изходяща тръби са били използвани за процеса на зареждане. Освен това, парафин Е46 е избран за МПФС в симулацията, тъй като има по-голяма термична стабилност от другите два. Скоростта на работния флуид на входящата тръба е 0,1 m/s и според входящата тръба течността прехвърля в акумулатора 1 kJ топлина на всяка секунда. От Фиг.3.17а може да се види, че топлината, идваща от входящата тръба, започва да зарежда контейнерите, които са противоположни на входящата тръба. Това е вярно, тъй като флуидът първо тече в тази област, но след циркулация над контейнерите по-голямата част от флуида тече надолу през центъра на акумулатора, като по този начин зарежда коаксиално разположените контейнери от вътрешния кръг. Основните поточни линии, при които е имало активен процес на топлообмен, са показани на Фиг.3.17б. След 180 min разпределението на температурата в акумулатора е все още неравномерно и контейнерите с МПФС са все още не напълно заредени - Фиг.3.17в.

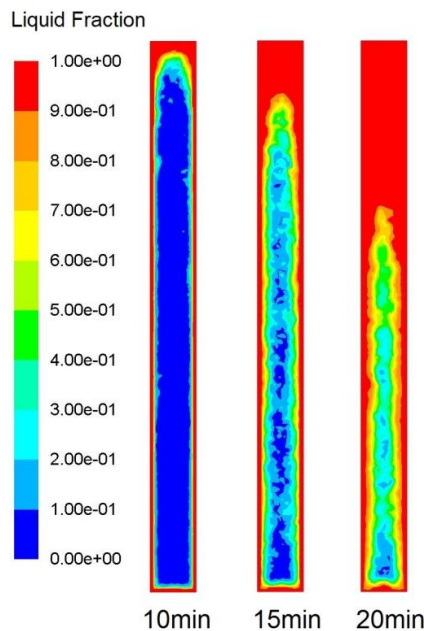


Фиг.3.17. Процес на зареждане с единични входяща и изходяща тръби: а) Разпределение на температурата в контейнерите след 60 min; б) Линии на потоците на топлоносителя с термичен ефект след 60 min; в) Разпределение на температурата в контейнерите след 180 min

Изводи към Глава 3.2.4.3.1

Следните изводи могат да се направят въз основа на проведеното моделиране и симулиране:

- Три случая бяха изследвани по отношение на числената симулация.
- От резултатите може да се заключи, че две входящи и две изходящи тръби са достатъчни за зареждане или разреждане на такъв ЛТА за достатъчно кратко време, тоест за три часа.
- Допълнително може да се отбележи, че контейнерите, които са във вътрешния кръг, се зареждат най-напред за кратко време, а контейнерите от външния кръг се зареждат след това. Може да се заключи, че контейнерите от външния кръг са много близо до стените на акумулатора, поради което тези зони не позволяват потоците на флуида и процесите на топлообмен да бъдат интензивни.



Фиг.3.18. Разпределение на течната фракция в секуща равнина, разполовяваща контейнера и успоредна на стената с ширина 80 mm при зареждане ($T_{wall}=80\text{ }^{\circ}\text{C}$)

3.2.4.3.2. Симулиране на ЛТА чрез техниката на енталпийна поръзност, използвана в ANSYS Fluent

Макро-капсулиран E53 парафин в контейнер от неръждаема стомана се разглежда като активна единица на топлоакумулатора. Симулацията изследва топлинното поведение на този компонент при различни температури на външните повърхности на контейнера, $T_{wall} = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ за режим на разреждане, $T_{wall} = 65\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ за режим на зареждане. Всички повърхности са с постоянна температура. Фиг.3.18 показва разпределението на течната фракция на 10, 15 и 20 min от започване на процеса на зареждане в секуща равнина, разполовяваща контейнера и успоредна на стената с ширина 80 mm. След 20 min зареждане течната

фракция е 88% като под действие на подемните сили парафинът е стратифициран - течен отгоре, твърд отдолу.

Изводи към Глава 3.2.4.3.2

Бе изпитан ефективен, по отношение на изчислително време, метод, използващ техниките на ANSYS Fluent за прогнозиране на процесите на фазова промяна. Представената симулация задава разпределението на температурата в макро-капсулиран парафин в правоъгълен контейнер със специфични размери, проектиран като активна единица в изпитателен топлинен акумулатор на топлинна слънчева система. Следните изводи са валидни в случая:

- Моделът демонстрира ефектите върху процеса на топене/втвърдяване на външната температура, коефициента на топлопроводност на топлоносителя и естествената конвекция вътре в МПФС.

- Изчислените резултати съответстват на наблюденията в литературата за факторите, влияещи върху капсулирането на МПФС.

- Симулациите добавят информация за по-добро разбиране и по-точно прогнозиране на процеса на фазова промяна, което е необходимо за проектирането на системи за акумулиране на топлина.

4. СМЕСЕНИ УРЕДБИ С АЛТЕРНАТИВНИ ЕНЕРГИЙНИ ИЗТОЧНИЦИ (АЕИ)

4.1. СЛЪНЧЕВИ КОЛЕКТОРИ С ВОДЕН АКУМУЛАТОР

4.1.1. Експериментално изследване на инсталация с вакуумни слънчеви колектори и воден топлоакумулатор

Изследвана е инсталация, състояща се от вакуумни слънчеви колектори с топлинни тръби и плосък абсорбер, както и воден топлоакумулатор с четворна серпентина. Представени са опитната структура и планът за измерване на тази инсталация (Фиг.3.2). Във функция на времето са измерени метеорологичните величини, температурите (преди и след компонентите на инсталацията) и дебитите през колекторите и през акумулатора. Измерванията са проведени с вода и Thermofrost P в колекторния контур, и с вода в акумулатора.

4.1.1.1. Опитната структура и план за измерване на уредбата

Планът за измерване от Фиг.3.2 показва, че балансирането на изпитваната уредба налага обхващането на следните групи от величини:

- Метеорологични величини: интензитет на сумарна слънчева радиация в плоскостта на слънчевите колектори $I_{ск,об}$, W/m^2 ; температура на околната среда $t_{ок}$, $^{\circ}C$; скорост на вятъра v_v , m/s ;

- Температури, особено преди и след компонентите на инсталацията;

- Дебити във функция на времето.

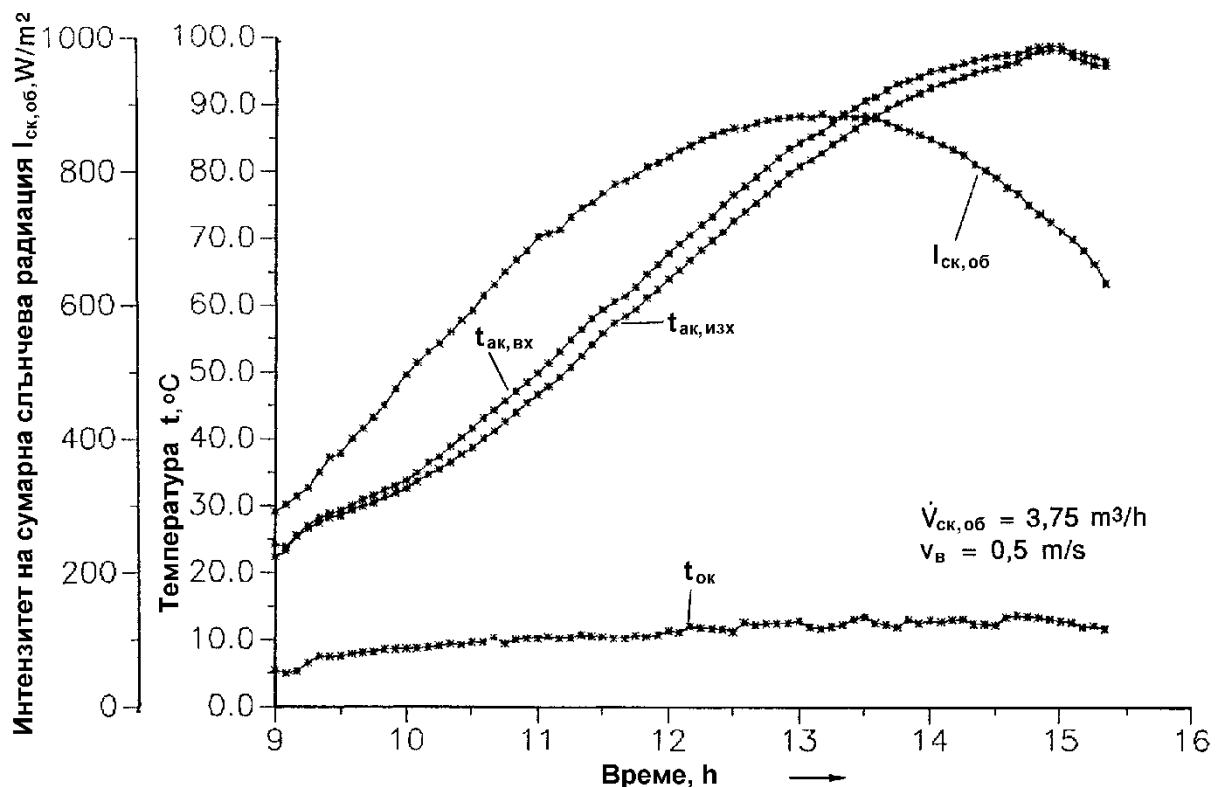
Оценяване на смесени уредби с алтернативни източници на енергия

В плана за измерване на инсталацията (Фиг.3.2) са отбелязани местата, където се измерват температурите с термодвойки тип L (Fe-CuNi).

4.1.1.2. Изследване на всички блокове от слънчеви колектори и на водния топлоакумулатор

Изследването на всичките 16 блока от слънчеви колектори (480 вакуумни слънчеви колектори) и на водния топлоакумулатор е проведено едновременно. В продължение на 6 дни са отчетени входящата и изходящата температура на флуида за акумулатора в колекторния контур $t_{ак,вх}$ и $t_{ак,изх}$, температурата на флуида в акумулатора $t_{ак}$, дебитът в колекторния контур $\dot{V}_{ск,об}$, дебитът в акумулаторния контур $\dot{V}_{ак}$ и метеорологичните данни (околна температура $t_{ок}$, сумарна радиация в равнината на слънчевите колектори $I_{ск,об}$ и скоростта на вятъра v_B). Измерванията са проведени с вода и Thermofrost P в колекторния контур.

Кривите на изменение на $t_{ак,изх}$, $t_{ак,вх}$, $I_{ск,об}$, $t_{ок}$, както и v_B и $\dot{V}_{ск,об}$ са представени на Фиг.4.1 за 13.10.1992 (работен флуид е Thermofrost P).



Фиг.4.1. Метеорологични данни от измерването на $t_{ок}$ и $I_{ск,об}$, и на входящата и изходящата температура на флуида за акумулатора в общия колекторен контур $t_{ак,вх}$ и $t_{ак,изх}$ за 13.10.1992 (работен флуид е Thermofrost P)

4.1.2. Математическо моделиране на инсталация с вакуумни слънчеви колектори с топлинна гръба и воден топлоакумулатор

Математическото симулиране е базирано на 2 математически модела - подробното определяне на изходящата температура от слънчевия колектор

$t_{\text{ск,изх}}$ е обсъдено в *т.3.1.1*, а определянето на температурата на флуида $t_{\text{ак}}$ в акумулатор с четворна серпентина е описано подробно в *т.3.2.2*.

В резултат са пресметнати последователно входящата температура на флуида в колектора $t_{\text{ск,вх}}$, изходящата температура на флуида от колектора $t_{\text{ск,изх}}$ и входящата температура на флуида в акумулатора $t_{\text{ак,вх}}$ в колекторния контур, както и температурата на флуида в акумулатора $t_{\text{ак}}$. Входяща температура за генератора на хладилна инсталация се явява $t_{\text{ак}}$.

4.1.2.1. Математически модел

Въз основа на математическите модели за вакуумен слънчев колектор с топлинна тръба, описан подробно в *т.3.1.1*.

$$(3.1) \quad C_{\text{еф}} \frac{\partial t_{\text{фл}}}{\partial \tau} + C_{\text{фл}} \cdot v_{\text{фл}} \frac{\partial t_{\text{фл}}}{\partial x} + \frac{t_{\text{фл}}}{R_{\text{об}}} = (\tau\alpha)_{\text{еф}} I_{\text{ск,об}}(\tau) + \frac{t_{\text{ок}}(\tau)}{R_{\text{об}}}$$

и за воден топлоакумулатор, описан подробно в *т.3.2.2*

$$(3.6) \quad \frac{\partial(m_{\text{ак}} \cdot h_{\text{ак}})}{\partial \tau} = \dot{Q}_{\text{ак}} + \dot{Q}_{\text{ст}} + \dot{Q}_{\text{тр}}$$

може да се създаде общ математически модел, с помощта на който могат да се пресметнат параметрите на системата вакуумни слънчеви колектори - воден топлоакумулатор (Фиг.3.2).

Изходящата температура на флуида от акумулатора $t_{\text{ак,изх}}$ и температурата на акумулатора $t_{\text{ак}}$ са разгледани като начални температури. След това се определя промяната на температурите с помощта на общ математически модел и в зависимост от времето в комбинираната система слънчеви колектори – акумулатор, като е зададена промяната по времето на сумарната слънчева радиация $I_{\text{хор,об}}$ и дифузната слънчева радиация $I_{\text{хор,диф}}$ върху хоризонтална плоскост, на околната температура $t_{\text{ок}}$, на околната температура на акумулатора $t_{\text{ок,ак}}$ и на скоростта на вятъра $v_{\text{в}}$. Това пресмятане се повтаря при следващите стъпки по времето.

4.1.2.2. Компютърна програма SKSP

Създадената компютърната програма SKSP описва явленията, които протичат в общата система слънчеви колектори – воден топлоакумулатор. Тя се състои от 8 подпрограми и се явява обща програма за програмите WRVK и „Speicher“.

В началото се въвеждат параметрите на системата (слънчеви колектори, акумулатор) и експлоатационните параметри $\dot{V}_{\text{ск,об}}$ и $\dot{V}_{\text{ак}}$.

Оценяване на смесени уредби с алтернативни източници на енергия

Следва въвеждането на началните стойности на $t_{ак,изх}$ и $t_{ак}$, коефициентите за пресмятане на сумарната радиация $I_{хор,об}$ и на дифузната радиация $I_{хор,диф}$ върху хоризонтална повърхнина, на скоростта на вятъра v_v , на околната температура $t_{ок}$ и на температурата на околната среда за акумулатора $t_{ок,ак}$, както и началните стойности на входящата температура на флуида в колекторите $t_{ск,вх}$, на температурата $t_{баз}$, на температурата на абсорбера $t_{аб}$, на температурата на прозрачното покритие $t_{пн}$, на входящата температура на флуида в акумулатора $t_{ак,вх}$ и коефициента на топлопреминаване $U_{то}$.

После се изчисляват всички параметри, които не зависят от времето. На базата на уравненията за топлинните загуби в тръбата между $t_{ак,изх}$ и $t_{ск,вх}$ се определя итеративно входящата температура на флуида в колекторите $t_{ск,вх}$, при което се използват подпрограми за определяне скоростта на вятъра v_v , на околната температура $t_{ок}$, на температурата на околната среда за акумулатора $t_{ок,ак}$ и на изходящата температура на флуида от акумулатора $t_{ак,изх}$.

При определена $t_{ск,вх}$, следва пресмятането на изходящата температура на флуида от колекторите $t_{ск,изх}$ с помощта на подпрограмите FGS8 и PINT и на подпрограмите за пресмятане на сумарната радиация $I_{хор,об}$ и на дифузната радиация $I_{хор,диф}$, при което температурите $t_{аб}$, $t_{пн}$ и $t_{баз}$ се определят итеративно. С помощта на уравненията за топлинните загуби в тръбата между температурата $t_{ск,изх}$ и температурата $t_{ак,вх}$ се пресмята итеративно температурата $t_{ак,вх}$. След като вече имаме $t_{ак,вх}$, можем да определим температурата на флуида в акумулатора $t_{ак}$.

С помощта на компютърната програма SKSP бе изследвана теоретично общата колекторна уредба, при което бяха изчислени изходящата температура на флуида от колекторите $t_{ск,изх}$ и температурата на флуида в акумулатора $t_{ак}$, тъй като тя се явява входен параметър за следващата част на хладилната уредба. Експерименталните данни на температурата $t_{ак}$ са сравнени със съответните изчислени стойности.

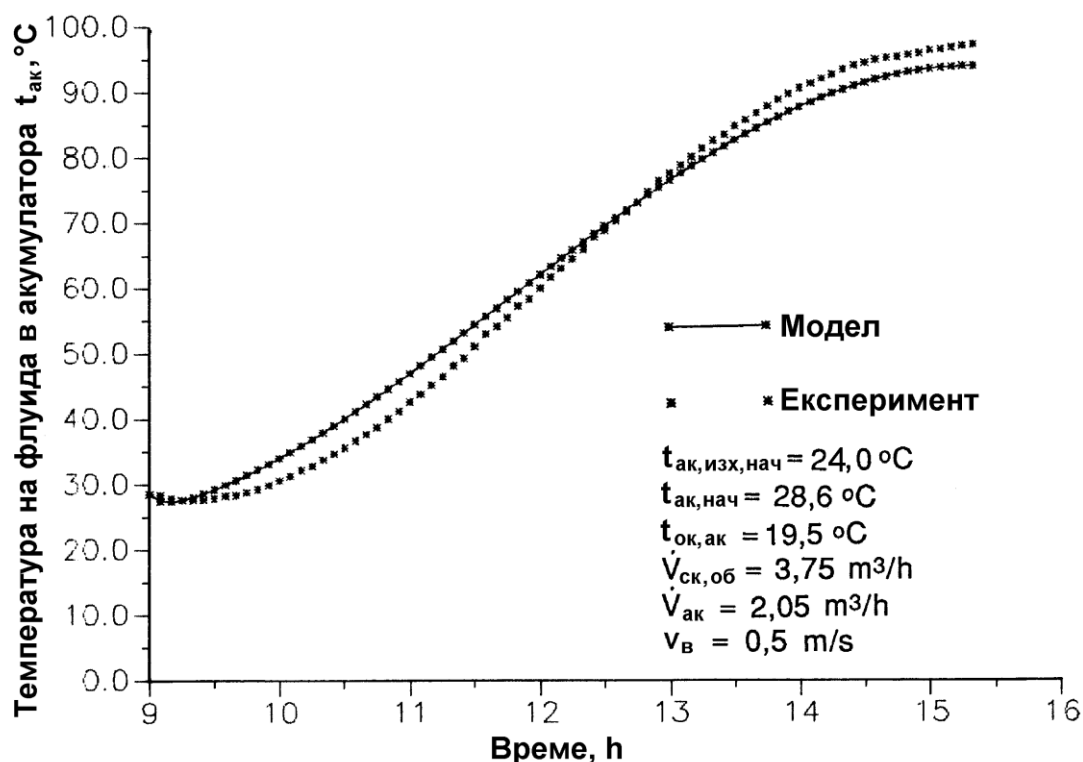
4.1.2.3. Сравняване на изчисленията с експерименталните данни на общата колекторна инсталация

С помощта на компютърната програма SKSP беше теоретично изследвана общата колекторна инсталация и бе пресметната изходящата колекторна температура $t_{ск,изх}$ и температурата на акумулатора $t_{ак}$. При изчисленията бяха използвани следните конструктивни данни на вакуумен слънчев колектор KLVR 140: ъгъл на наклона на колектора спрямо

хоризонталната плоскост $s = 45^\circ$, брой на колекторите $n_{ск} = 480$, географска ширина $\phi = 50,87^\circ$ (за град Зиген), азимутален ъгъл на колектора $\gamma = -29^\circ$, отражателна способност на задния рефlector $\rho_{зр} = 0,1$.

Избраните експериментални атмосферни данни са за 13.10.92 (работен флуид е Thermofrost P). Стойностите на физичните параметри на работния флуид (специфичен топлинен капацитет, топлопроводност, кинематичен вискозитет, число на Прандтл, и плътност съответно) са приети за постоянни през целия ден: $c_{фл} = 3910 \text{ J/kgK}$; $\lambda_{фл} = 0,445 \text{ W/mK}$; $\nu_{фл} = 1364 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$; $Pr_{фл} = 12,1$ и $\rho_{фл} = 1010 \text{ kg/m}^3$.

Избрана беше средната температура на околната среда за акумулатора (лаборатория и мазе) $t_{ок,ак} = 19,5^\circ\text{C}$. Началната температура на акумулатора беше $t_{ак,нач} = 28,6^\circ\text{C}$, а обемните дебити на флуида в колекторния контур и през акумулатора - $\dot{V}_{ск,об} = 3,75 \text{ m}^3/\text{h}$, $\dot{V}_{ак} = 2,05 \text{ m}^3/\text{h}$ съответно.



Фиг.4.2. Сравняване на измерената и изчислената температура на флуида в акумулатора $t_{ак}$ при зареждане на 13.10.1992 (работен флуид е Thermofrost P)

Само 2 начални стойности поддържат изчислението - изходящата температура на флуида от акумулатора $t_{ак,изх,нач} = 24^\circ\text{C}$ на 13.10.1992, и температурата на акумулатора $t_{ак,нач} = 28,6^\circ\text{C}$. Изчислени са входящите и изходящите температури на инсталацията под въздействието на метеорологичните данни при всяка стъпка (5 min) в програмата SKSP.

Експерименталните резултати и съответните пресметнати стойности на температурата на акумулатора $t_{ак}$ са сравнени и показани на Фиг.4.2.

Изводи към Глава 4.1

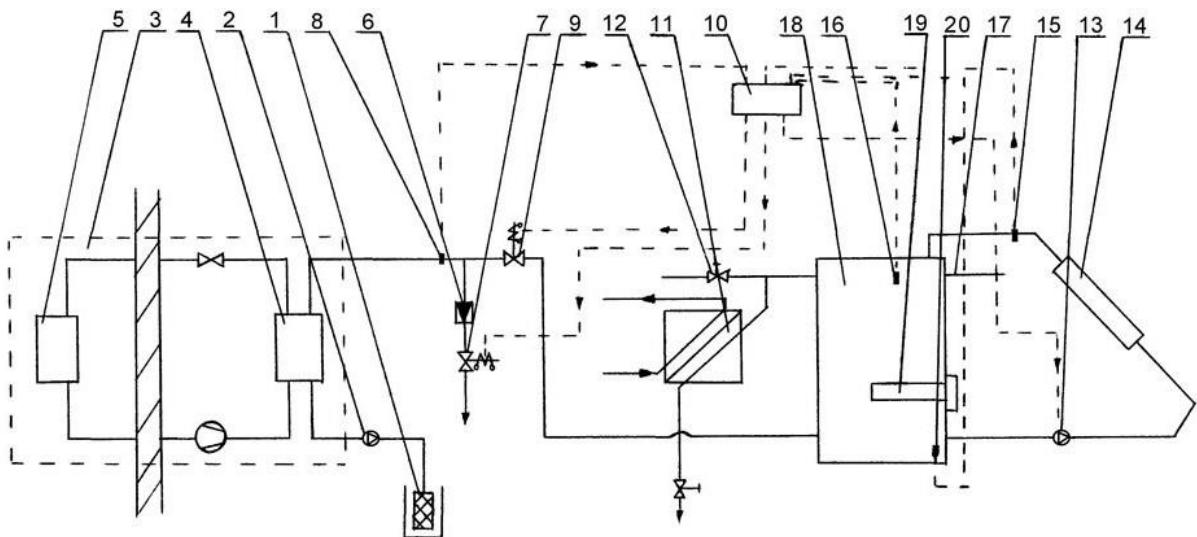
Изводите от теоретичното и опитно изследване на инсталация с вакуумни слънчеви колектори и воден топлоакумулатор са следните:

- Съвпадението на измерената и изчислената температура в акумулатора (Фиг.4.2) е много добро. Разликите между модела и експеримента в температурите на акумулатора са следствие от факта, че тръбите между акумулатора и слънчевите колектори не са били изолирани по време на експеримента;

- Предложеният модел може да се използва за изчисление на изменение на температурата на подобни инсталации, които работят при много високи температури на флуида (повече от 90 °С).

4.2. ХЛАДИЛНА ИНСТАЛАЦИЯ С ВГРАДЕНИ СЛЪНЧЕВИ КОЛЕКТОРИ И ТОПЛОАКУМУЛАТОР

При хладилните инсталации обикновено се използва студът, получен от изпарителя, а топлината от кондензатора, която е нископотенциална енергия, се изхвърля в околната среда. Тук разглеждаме един от начините за оползотворяване на тази енергия при хладилен агрегат с водоохлаждаем кондензатор (Фиг.4.3), като в системата са вградени и слънчеви колектори.



1 - воден източник; 2, 13 - циркуляционна помпа; 3 - хладилен агрегат; 4 - кондензатор; 5 - изпарител; 6 - възвратен клапан; 7, 9 - магнетвентил; 8, 15, 16, 20 - термосензор; 10 - блок за управление; 11 - топлообменник за подгриване на вода за битови и технологични нужди с питейни качества; 12 - топла вода; 14 - слънчеви колектори; 17 - преливник; 18 - акумулатор; 19 - електронагревател.

Фиг.4.3. Схема на хладилна инсталация със слънчеви колектори и топлоакумулатор

Подгрявата в кондензатора **4** вода отива в топлоакумулатор **18**. Оттам водата се подгрява с помощта на плоски водни слънчеви колектори **14** до по-високо температурно ниво. В зависимост от качеството на желаната вода може да се използва топлообменник **11** за подгряване на вода за битови и технологични нужди с питейни качества или да се черпи топла вода от **12**.

Използването на тази инсталация за производство на топла вода може да става през месеците от април до октомври. Тогава за топлоносител в слънчевите колектори се използва вода. Допълнително повишаване на ефективността на инсталацията може да се постигне, ако тя се използва и през зимата. Тогава ще е необходимо поставянето на допълнителен топлообменник между акумулатора и колекторите, като се образува нов циркуляционен кръг през колекторите. За работно вещество в „слънчевия кръг“ вместо вода е удачно да се използват гликолови разтвори поради минусовите температури на околната среда.

Водният акумулатор е оборудван с електронагревател **19** с цел нагриване на водата до необходимата температура при облачно време и през зимата. Така се поддържа желаното температурно ниво, като нагревателят се включва от 22 до 6 h, когато стойността на електроенергията е най-ниска.

Когато работят хладилният агрегат и слънчевите колектори, но няма консумация на топла вода, излишното количество вода се изтича през преливника **17**. При изключен компресор на термopомпата температурното ниво в акумулатора се поддържа чрез циркулацията на водата през слънчевите колекторите.

При недостатъчна слънчева радиация слънчевите колектори се изключват, защото в противен случай ще работят като охладители. Магнетвентилът **9** спира притока на вода към акумулатора, когато температурата на водата след кондензатора е по-ниска от тази в акумулатора. Тогава се отваря магнетвентилът **7** и водата се оттича в канализацията.

За управление на цялата система е предвиден регулиращ блок **10**. Входните въздействия за него са импулсите, получени от термосензорите **8**, **15** и **16**, които отчитат температурата на водата съответно след кондензатора, на изхода на слънчевите колектори и в акумулатора. Изходните въздействия са насочени към магнетвентилите **7**, **9** и циркуляционната помпа **13** за поддържане на необходимите режими.

Изводи към Глава 4.2

Тази схема е особено целесъобразна за реализиране в предприятията на хранително-вкусовата, фармацевтичната, биотехнологичната и др. промишлености, в които едновременно е необходима консумация както на студ, така и на топлина.

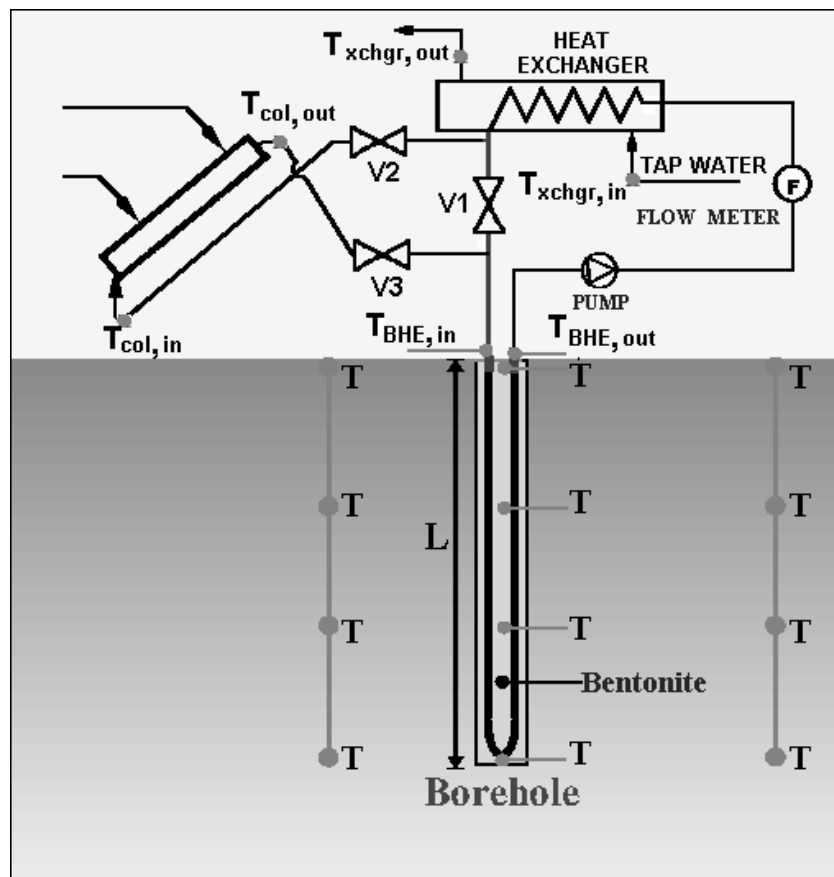
4.3. ВЕРТИКАЛЕН ТОПЛИНЕН ЕНЕРГИЕН АКУМУЛАТОР (ВТЕА) СЪС СЛЪНЧЕВИ КОЛЕКТОРИ

4.3.1. Конструкция на ВТЕА инсталацията

Изграждането на Вертикален топлинен енергиен акумулатор в ТУ (UTFSM), Валпарайсо, Чили е подробно описана в *т.3.2.3.1.1* (Фиг.3.4).

4.3.1.1. Подготовка на инсталацията за режим на зареждане

Преустройството на инсталацията започна веднага след завършването на теста Определяне на топлинни характеристики (ОТХ). Три слънчеви колектора бяха свързани към ВТЕА (Фиг.4.4). Общата им активна площ е около $4,4 \text{ m}^2$ (размерът на колектора е $1,05 \text{ m} \times 1,40 \text{ m}$). Разстоянието между колекторите и ВТЕА е около 2 m.



Фиг.4.4. Схема на преустроената експериментална уредба

Два допълнителни байпасни клапана V_2 и V_3 (Фиг.4.4) бяха монтирани, за да позволят инсталацията да работи в два различни режима в зависимост от вида на използвания източник на енергия - режим ОТХ, ако захранването е само от електрическия нагревател (вентил V_1 е отворен, клапаните V_2 и V_3 са затворени), слънчев режим - ако ВТЕА се зарежда посредством слънчева енергия (вентил V_1 е затворен, клапани V_2 и V_3 са отворени).

4.3.1.2. Подготовка на инсталацията за режим на разреждане

След цикъла на зареждане бе направена нова модификация на хидравличната система. Единият контур на кръстосан топлообменник „вода-вода“ (автомобилен радиатор) бе свързан към ВТЕА веригата вместо към слънчевите колектори, а другият контур се захранва от водната мрежа.

Водата от мрежата циркулира през радиатора, превръщайки се в студен контур на топлообменника, а водата от ВТЕА циркулира между радиатора и стените на корпуса, като по този начин се превръща в топъл контур.

4.3.2. Експериментално изследване

4.3.2.1. Фаза на зареждане

Инсталацията беше преработена след реализирането на ОТХ и беше използвана за подаване на слънчева енергия към земята (режим на зареждане) под формата на натурален експеримент. Тестът беше проведен в продължение на 29 дни (от 18 август до 16 септември 2003г.). Температурите на входа и изхода на вертикалния топлообменник (ВТО), температурите на входа и изхода на колектора и температурата на околната среда бяха измерени и записани всяка минута по време на експеримента. Въпреки че дебитът бе фиксиран при постоянна стойност от 3,17 l/min, той периодично бе измерван и контролиран. Температурните сензори на диференциалния контролер бяха разположени така, че да измерват температурите на изхода от колектора и на входа на ВТО. Точките на настройка бяха съответно 5 °C и 2 °C за включване/изключване на помпата.

4.3.2.2. Фаза на разреждане

След цикъла на зареждане бе инсталиран топлообменник за отвеждане на топлина от земята в режим на разреждане. Експериментът започна на 17 септември и завърши на 30 септември 2003г. Температурата на околната среда, температурата на входа и изхода на ВТО (свързана с топлия контур на топлообменника) и температурата на входа и изхода към студения контур на топлообменника бяха измерени и записани през тази фаза. Дебитите, измерени в топлите и студените кръгове на топлообменника, бяха съответно 3,17 l/min и 1,6 l/min.

4.3.3. Симулиране с TRNSYS на процесите във ВТЕА уредбата

Анализът на експерименталните данни беше направен с помощта на модула TRNSYS DST (ТИП 141). Един от параметрите, необходими за DST алгоритъма, е обемът на ПТЕА акумулатора. В тази връзка беше определен виртуален цилиндричен обем, обграждащ ВТО с дълбочина, равна на тази на ВТО и 4 m в диаметър. Файлът с данните на измерената температура на околната среда, температурите на входа и изхода на

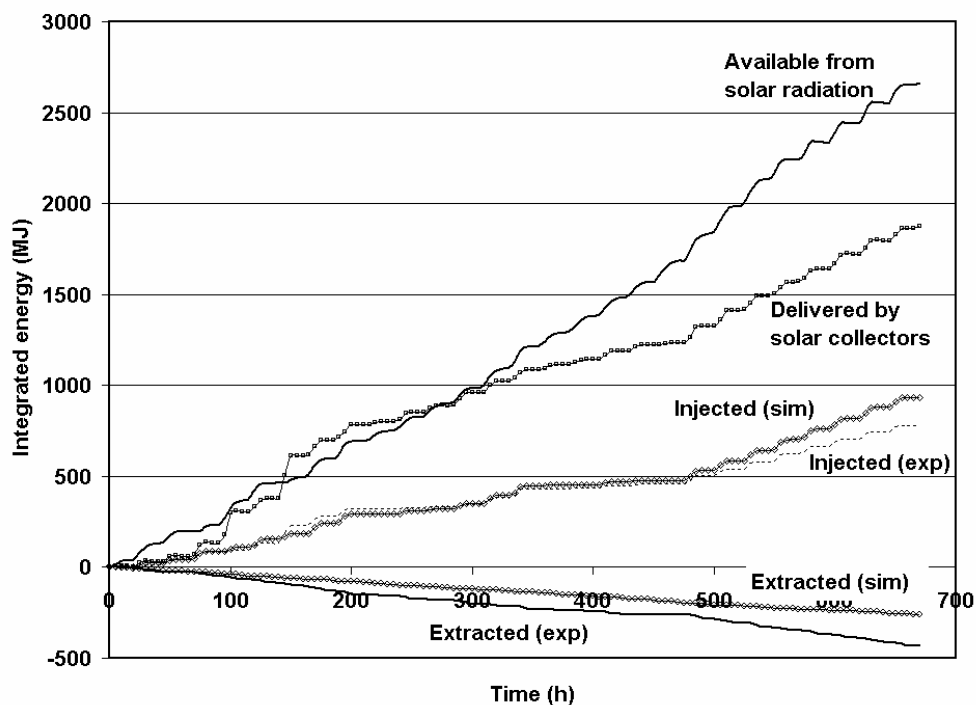
Оценяване на смесени уредби с алтернативни източници на енергия

колектора и температурите на входа и изхода на ВТО, както и на слънчевата радиация бяха използвани като вход за кода на TRNSYS.

Фиг.4.5 показва изменението на натрупаните енергии в системата във функция на времето през целия период на фазата на зареждане. Прави впечатление, че наличната слънчева радиация, натрупана в края на фазата на зареждане, достига почти 2750 MJ. Слънчевите колектори доставят около 70% от наличната слънчева радиация и от своя страна само около 50% от тази енергия се подава във ВТЕА. Освен това се наблюдава добро съвпадение между симулираната и експерименталната подадена енергия. Разликата се дължи на приемането за постоянна работа на помпата, което прави цикъла на подаване на топлина по-ефективен.

Изводи към Глава 4.3

Представени са и са анализирани данните от експеримент за зареждане и разреждане на плитък ВТО. Симулации, използващи TRNSYS тип 141 помагат да се идентифицират източниците на топлинни загуби през границите на акумулиране и да се квалифицира тяхното въздействие върху топлообменния процес.



Фиг.4.5. Изменение на натрупаните енергии в системата във функция на времето при зареждане

Основните изводи са следните:

Фаза на зареждане:

- Теплоизолацията над ПТЕА доказано намалява топлинните загуби през горната граница с ~ 80%;

- Симулациите показват, че страничните загуби се появяват за първи път след около 72 часа и се очаква да се повишат рязко до 46 % от общата подведена топлинна енергия до края на периода на зареждане.

Фаза на разреждане:

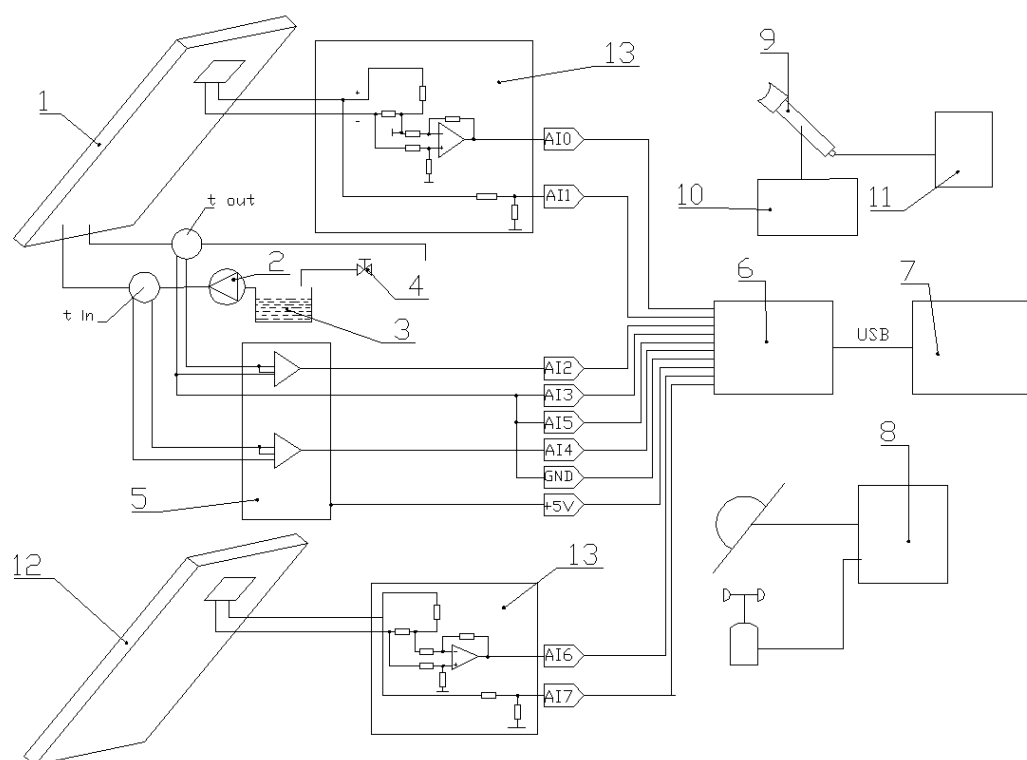
- Експерименталният спад на средната температура във ВТЕА по време на разреждане (изчислен чрез измервания на температурата от сонди в почвата на 0,5 m и 1 m разстояние от ВТО) съвпада по големина и форма със симулираната средна температура на акумулиране, получена от симулациите на TRNSYS.

4.4. ФОТОВОЛТАИЧНО-ТОПЛИННИ (PV/T) ИНСТАЛАЦИИ

4.4.1. Конструкции на PV/T инсталации

4.4.1.1. PV/T инсталация в ТУ София, филиал Пловдив

Инсталацията е за експериментално изследване на плосък PV/T колектор, охлаждан с вода. Чрез нея бяха тествани 2 стандартни тънкослойни фотоволтаични панела. Единият от тях бе трансформиран в комбиниран PV/T колектор с малки капиталовложения и усилия.



Фиг.4.6. Схема на инсталацията

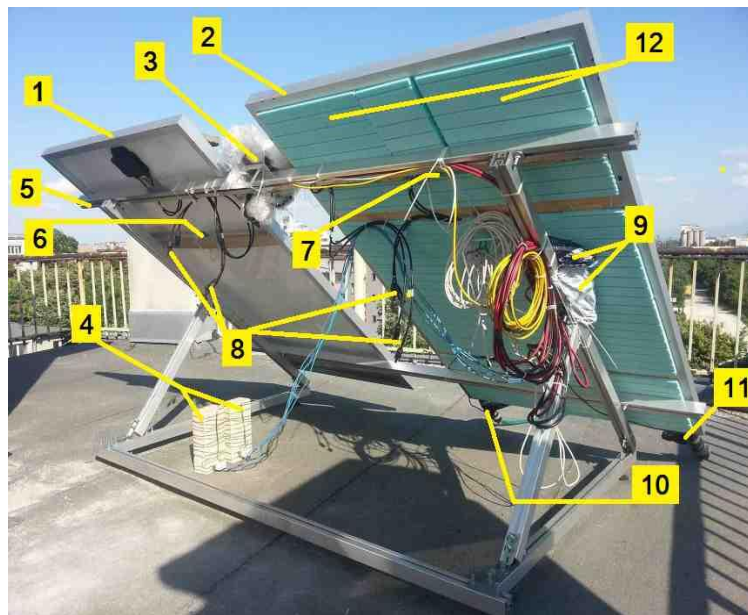
Инсталацията бе изградена в ТУ София, филиал Пловдив през пролетта на 2010г. (Фиг.4.6). Главни части на инсталацията са комбиниран PV/T слънчев колектор **1** и обикновен PV панел **12**. Помпата **2** задвижва охлаждащия флуид през комбинирания панел **1** и термостатичния съд **3**, който се използва за поддържане на постоянна температура в PV-T

Оценяване на смесени уредби с алтернативни източници на енергия

колектора. За измерване на температурата се използват термосъпротивления **5** от типа PT100. Полученият сигнал се изпраща към система за запамятане на данни (data logger) **6** и се обработва чрез Лаптоп или персонален компютър **7**. Комбинираният интегриращ солариметър/ анемометър **8** се използва за измерване на глобалната слънчева радиация и скоростта на вятъра. Пирхелиометърът **9** измерва директната слънчева радиация с помощта на слънчева следяща система (sun tracker) **10** и устройството за измерване на директна слънчева радиация **11**. Токовете сигнални преобразуватели **13** се използват за измерване напрежението и големината на тока от двата панела, след което се изчислява получената от слънцето електрическа мощност.

4.4.1.2. PV/T инсталация в ПУ „Паисий Хилендарски“, гр. Пловдив

През 2017 г. в ПУ „Паисий Хилендарски“ е проектирана слънчева топлинна система, комбинирана с фотоволтаични панели. Системата се състои от две основни подсистеми: термична част и електрическа част.



1-PV панел; 2-PV/T панел; 3-пиранометър CMP6; 4-тежести; 5-Метална стойка; 6-сензор за температурата на PV панела; 7- сензор за температурата на PV/T панела; 8- Клеми на захранващия кабел; 9-карта за разширение и DAQ платка; 10-сензор на изходящата температура на флуида; 11-сензор на входящата температура на флуида; 12-изолация на PV/T панела

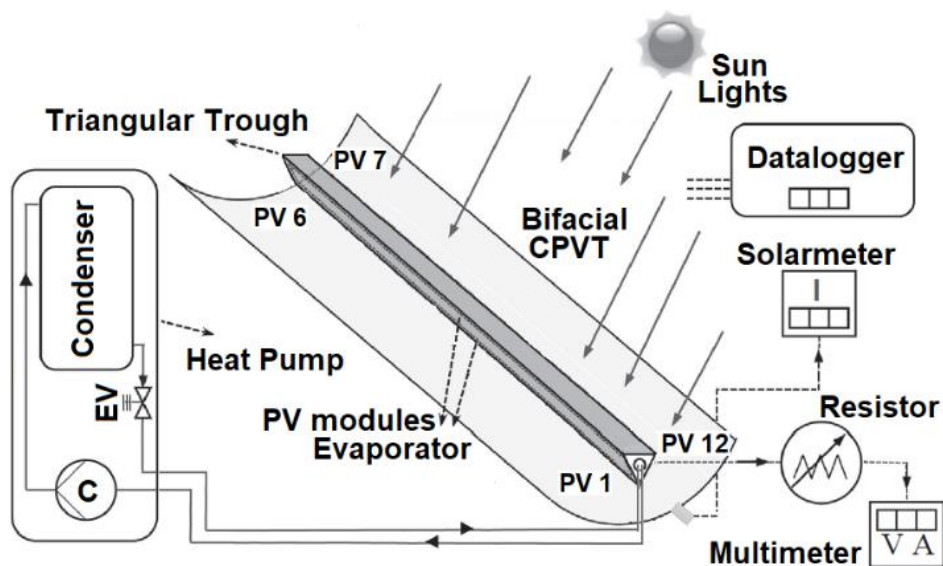
Фиг.4.7. Фотоволтаична (PV) и фотоволтаично-топлинна (PV/T) опитна уредба

Като част от топлинната подсистема е изследвана PV/T панелна конструкция (1). Проведени са експериментални проучвания, за да се определи неговата ефективност и да се сравнят характеристиките с други съществуващи проби. Два идентични поликристални фотоволтаични модула 250 Wp, произведени от фирма Crane, бяха монтирани заедно върху алуминиева основа, като слънчева част на инсталацията (Фиг.4.7). И

двата панела бяха поставени на юг и обърнати към слънцето под ъгъл на наклона 40° . В същата равнина на рамката е монтиран пиранометър Kipp & Zonen CMP6. Един от фотоволтаичните панели беше реконструиран като PV/T-тип. Температурни сензори Pt100 клас-А бяха използвани за измерване на входящата и изходяща температура на флуида на PV/T панелите.

4.4.1.3. Концентрираща CPV/T система с термopомпа, монтирана в Университета на Мугла Ситки Кочман в Мугла, Турция

За да се увеличи излъчването, падащо върху PV и електрическата ефективност на PV, слънчевата радиация се фокусира върху PV с огледала. Тази система се нарича концентриращ фотоволтаичен модул (CPV). PV и CPV системите имат проблем с прегряването. Прегряването води до намаляване на електрическия КПД. Поради тази причина той трябва да се охлажда. PV и CPV системите, които се охлаждат с някакъв флуид, се наричат PV/T и CPV/T. Много течности могат да се използват като работна течност. В това изследване за охлаждане на PV клетките е използван хладилен агент, минаващ през изпарителя на термopомпа или с вода. Опитната инсталация на концентрираща фотоволтаична-топлинна (CPV/T) е създадена в Университета на Мугла Ситки Кочман в Мугла, Турция. Нейната структура е показана на Фиг.4.8.



Фиг.4.8. Схема на CPV/T система с термopомпа

Тридесет и едно огледала бяха поставени в слънчеви концентратори, за да фокусират слънчевата радиация върху PV клетките. Метална рамка с триъгълна форма беше поставена върху слънчевия концентратор. PV модулите са разположени на двете повърхности на триъгълна рамка. Шест PV клетки са свързани последователно на двете повърхности. Третата повърхност е боядисана в матов цвят, за да абсорбира радиацията.

Оценяване на смесени уредби с алтернативни източници на енергия

Изпарителят на термopомпата (ТП) е разположен зад PV модула. Измерванията на температурите са взети от осем точки в задната повърхност на CPV/T уредбата. R134a е използван като хладилен агент в термopомпата, чийто дебит се измерва по време на опитите. ТП се използва за охлаждане на CPV/T уредбата. Изследвана е промяната на електрическия КПД и произведената електрическата мощност на CPV/T системата с и без ТП.

4.4.2. Проведени изследвания с PV/T инсталации

4.4.2.1. PV/T инсталация в ТУ София, филиал Пловдив

Експериментите с инсталацията показана на Фиг.4.6 са проведени в продължение на 2 дни - 26 и 27 май 2010г. Направени са 7 теста, всеки един от по 15 min. Измервани са следните параметри: интензитет на глобалната слънчева радиация, околна температура, дебит на флуида, входяща и изходяща температура през PV/T колектора, произведена електрическа мощност от обикновения (PV) и комбинирания (PV/T) панел. Пресметнати са произведената топлинна мощност от PV/T колектора, отношението на електрическата мощност PV/T към PV панела и отношение на топлинната мощност към електрическата мощност при PV/T панела.

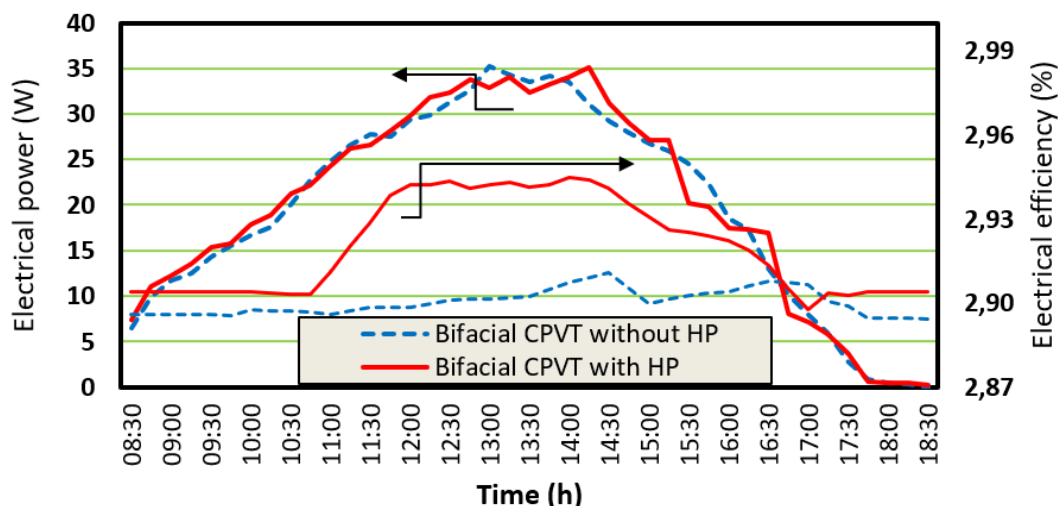
4.4.2.2. PV/T инсталация в ПУ „Паисий Хилендарски” Пловдив

По време на експлоатацията на PV/T панели в реални условия входящата температурата на флуида варира в широки граници. Когато буферният резервоар за гореща вода е студен (в началото на процеса на нагриване на водата), температурата на входящата вода е около 15°C. В края на процеса тя може да достигне 60 °C. Това води до влошаване на условията за охлаждане на фотоволтаичните клетки и дори до понататъшното им нагриване. В последния случай охлаждането на панела става само през предната му страна от околния въздух. Ето защо е важно да се изследва температурният диапазон на входящия флуид, за който ефективността на производство на електроенергия на PV/T панела е по-висока от тази на PV панела.

4.4.2.3. CPV/T система с ТП в Университета в Мугла, Турция

Топлинният КПД на ТП-CPVT системата е по-нисък от този на CPV/T уредбата, тъй като PV/T се охлажда от термopомпа. В допълнение, електрическият КПД на ТП-CPVT е по-висок от този на CPV/T. Фотоволтаичните модули на CPV/T се охлаждат с вода, а тези на ТП-CPVT системата чрез хладилния агент, минаващ през изпарителя на термopомпата. Експериментите са проведени в продължение на 1 седмица. Обработени бяха данните през дните, в които стойностите на радиацията и околната температура при двете системи бяха приблизително еднакви.

Средното производство на електроенергия между 08:30 и 18:30 е съответно 20,06 W и 19,83 W за CPVT с и без термопомпа (Фиг.4.9). Електрическият КПД на PV е съответно 2,95% и 2,90% за CPVT с и без термопомпа.



Фиг.4.9. Изменение на електрическата мощност и електрическият КПД във времето

Изводи към Глава 4.4.2.3

В това проучване се цели да се изследва промяната в електрическата и топлинната ефективност на CPV/T уредба, която се охлажда с хладилен агент протичащ през изпарителя на термопомпа и с вода. Консумацията на електроенергия на компресора на ТП е по-висока от производството на електроенергия от CPV/T. Въпреки че стойностите на електрическият КПД са близки една до друга за двете системи, топлинният КПД на CPV/T е по-висок от този на ТП-CPV/T. Също така общата ефективност на CPVT е по-висока от тази на ТП-CPV/T.

4.4.3. Обработка на опитните резултати

4.4.3.1. PV/T инсталацията в ТУ София, филиал Пловдив

Резултатите от тест 6 са представени на Фиг.4.10, която показва произведената електрическа мощност от PV и PV/T панел на 27.05.2010г., започвайки от 10:55 ч. Очевидно е, че охлажданият PV/T панел произвежда повече електроенергия. Освен това температурата на охлаждащата течност се повишава.

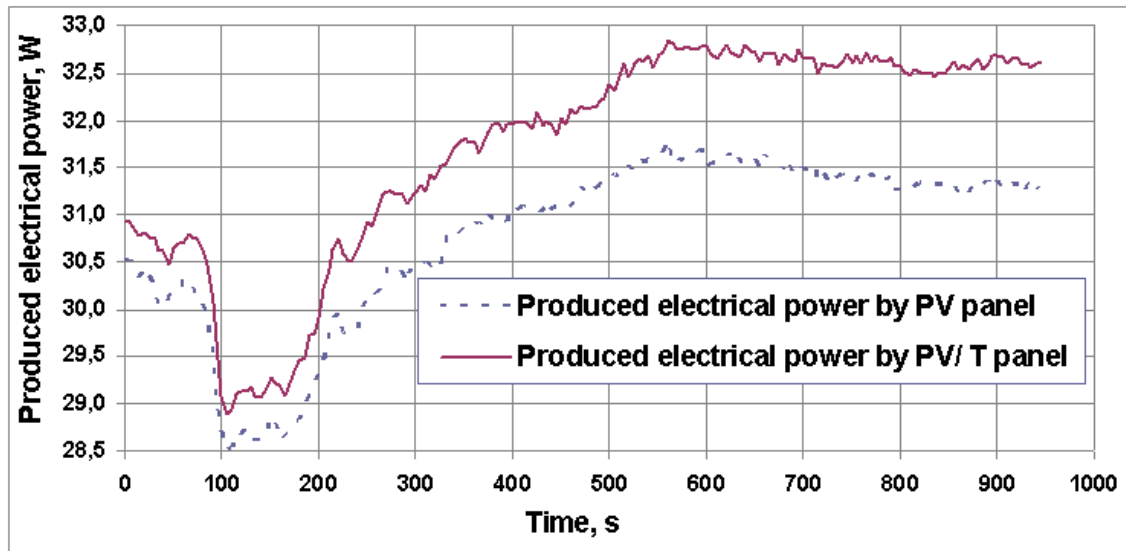
Изводи към Глава 4.4.3.1

Направени са изследвания на два еднакви по големина панела, като единият е проектиран като PV/T колектор. Опитите показват следното:

- PV/T панелът, който се охлажда с флуид има по-висок КПД от другия панел (около 3% повече) - Фиг.4.10;

Оценяване на смесени уредби с алтернативни източници на енергия

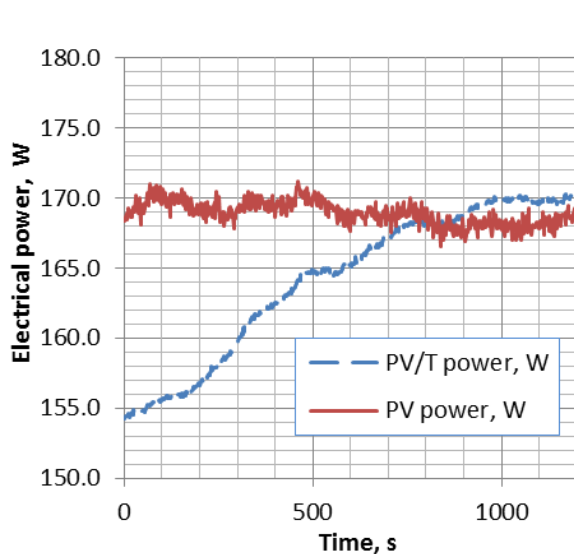
- отведена е топлина от PV/T колектора (около 9 пъти повече от електроенергията в температурния интервал от 20 до 50 °C);
- ефектът на по-добро електропроизводство в PV/T колектора е стабилно в относително дълъг температурен интервал;
- охладеният PV/ T панел произвежда в целия температурен интервал около 3% повече електроенергия от PV панела;
- колкото по-ниска е работната температура на панела, толкова по-голяма е получената топлинна мощност.



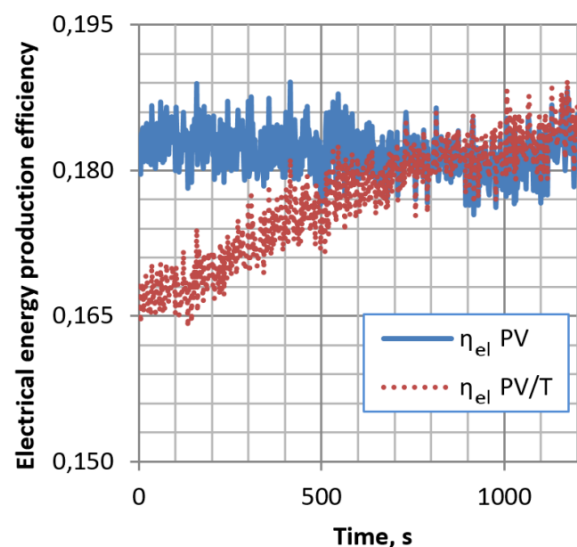
Фиг.4.10. Произведена електрическа енергия от PV и PV/ T панелите на 27.05.10г.

4.4.3.2. PV/T инсталацията в ПУ „Паусий Хилендарски” Пловдив

Произведените електрически мощности за всеки от сравнените PV и PV/T панели са показани на Фиг.4.11.



Фиг.4.11. Сравнение на производството на електроенергия от PV и PV/T панелите



Фиг.4.12. Изменение на ефективностите на PV и PV/T панелите

При започване на теста фотоволтаичният панел работи в стационарно състояние и температурата на клетката е почти постоянна, благодарение на охлаждането с околния въздух. От друга страна, циркулацията на течността в топлообменника на PV/T панела е включена и зоната на клетката му е прегрята поради топлоизолацията на панела отзад. През този преходен период явната топлина, акумулирана от елементите на PV/T панела, предизвиква производството на голям топлинен поток, много по-голям от входящата слънчева светлина. Ефективността на двата панела по време на едно и също изпитване е представена на Фиг.4.12. В началото на теста PV панелът генерира 15 W повече от PV/T панела. В стационарно състояние ефективността на PV/T панела става с около 1% по-висока от ефективността на PV панела.

Изводи към Глава 4.4.3.2

Следните изводи могат да се направят от проведените изследвания:

- Извършени са няколко теста за измерване на някои характеристики на конструирания PV/T панел. В резултат на това от експериментите беше установено, че ефективността и електрическата мощност на всяка фотоволтаична клетка намалява с повишаването на температурата. На първия етап от изпитването, когато PV/T не е добре охладен (температура на PV клетката 75,6 °C), неговата електрическа ефективност и електрическа мощност са по-ниски от тези на PV панела, който се охлажда до 60,3 °C от околния въздух;

- В резултат на тестовете е установен лош топлинен контакт между тръбата и задната страна на клетъчната плоча. Направеният извод е, че е необходимо да се промени дизайна на панела, за да се намали термичното съпротивление на контакта между тръбата и плочата.

- При по-високи температури топлообменът в PV/T панела се влошава и енергийната мощност на PV панела става по-добра. Така че PV/T панелите (в термичната част) не трябва да се свързват последователно поради лошите условия на работа на панела при най-високата температура. Успоредното свързване е за предпочитане.

4.5. ЗЕМНО БАЗИРАНА ТЕРМОПОМПЕНА (ЗБТП) СИСТЕМА СЪС СЛЪНЧЕВИ КОЛЕКТОРИ (ПВСК)

4.5.1. Конструкция на ЗБТП система със слънчеви колектори

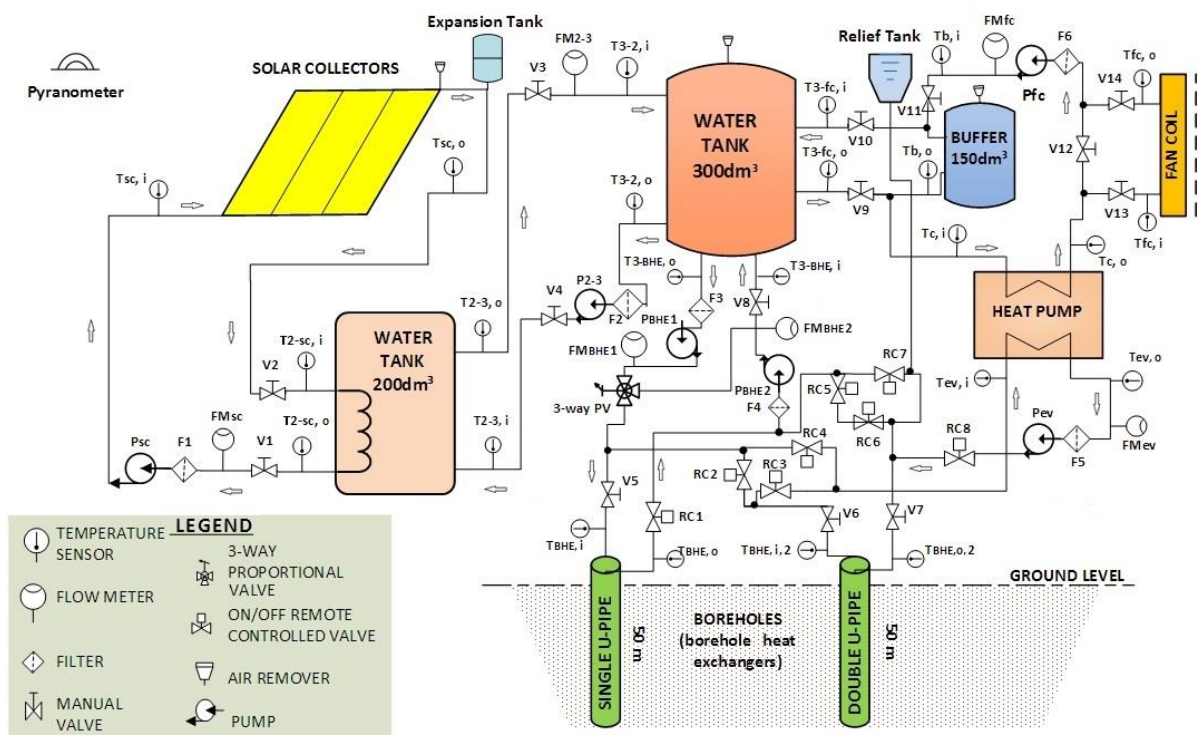
В ТУ - София, филиал Пловдив е изградена експериментална система състояща се от земно базирана термопомпена система и слънчеви колектори (Фиг.4.13). Тя се състои от следните основни части:

- Три плоски слънчеви колектора (ПВСК) свързани успоредно (всеки с площ от 2,15 m²);

Оценяване на смесени уредби с алтернативни източници на енергия

- Резервоар за гореща вода (200 dm³) с допълнителен електрически нагревател с мощност 3 kW;
- Изолиран воден топлоакумулатор от неръждаема стомана (300 dm³);
- Термопомпа „вода-вода“ HWW-A/WP 15 (производство на “Маха”);
- Теплоизолиран буферен съд – 150 dm³;
- Вентилаторен конвектор Sabiana Carisma CRC тип „въздух-вода“;
- Два вертикални топлообменника (ВТО) са разположени на нивото на земята (те са с единичен и двоен контур).

Преди изследването на уредбата бяха проведени тестове за Определяне на топлинни характеристики (ОТХ) за оценка топлопроводността на почвата λ и термичното съпротивление на ВТО R_b .



Фиг.4.13. Схема на смесена ЗБТП уредба със слънчеви колектори

4.5.2. Методика за изследване на ЗБТП система с ПВСК

4.5.2.1. Ефективност на смесената система при различни режими на работа

Режим на зареждане на водните акумулатори с топлина от ПВСК

Ефективността на системата при този режим се определя като съотношение на акумулираната топлина във водните акумулатори към сумарната слънчева радиация в равнината на слънчевите колектори плюс електрическата мощност на циркулационните помпи през периода на изпитване:

$$(4.1) \quad \eta_{s,1} = \frac{m_{st} \cdot c_{st} \cdot (t_{st,end} - t_{st,in})}{\sum_{i=1}^n \int_0^{t_i} (I_{sc} \cdot A_{ab} + N_{sc}) d\tau + \int_0^{t_{end}} N_{2-3} d\tau}$$

Режим на зареждане на ВТО с топлина от ПВСК

Ефективността на системата при този режим се определя като съотношение на топлината, подведена към ВТО, към сумарната слънчева радиация в равнината на слънчевите колектори плюс електрическата мощност на циркулационните помпи през периода на изпитване:

$$(4.2) \quad \eta_{s,2} = \frac{\int_0^{\tau_{end}} \dot{m}_{BHE} \cdot c_{BHE} \cdot (t_{BHE,i} - t_{BHE,o}) d\tau}{\sum_{i=1}^n \int_0^{\tau_i} (I_{sc} \cdot A_{ab} + N_{sc}) d\tau + \int_0^{\tau_{end}} N_{2-3} d\tau + \int_0^{\tau_{end}} N_{BHE} d\tau}.$$

Режим на директно слънчево отопление

Ефективността на системата при този режим се определя като съотношение на топлината, подведена към въздушния конвектор, към сумарната слънчева радиация в равнината на слънчевите колектори плюс електрическата мощност на циркулационните помпи през периода на изпитване:

$$(4.3) \quad \eta_{s,3} = \frac{\int_0^{\tau_{end}} \dot{m}_{fc} \cdot c_{fc} \cdot (t_{fc,i} - t_{fc,o}) d\tau}{\sum_{i=1}^n \int_0^{\tau_i} (I_{sc} \cdot A_{ab} + N_{sc}) d\tau + \int_0^{\tau_{end}} (N_{2-3} + N_{fc}) d\tau}.$$

Отоплителен режим със ЗБТП

Ефективността на системата при този режим се определя като съотношение на топлината, подведена към вентилаторния конвектор, и топлината, отведена от ВТО плюс електрическите мощности на термopомпата и циркулационните помпи през периода на изпитване:

$$(4.4) \quad \eta_{s,4} = \frac{\int_0^{\tau_{end}} \dot{m}_{fc} \cdot c_{fc} \cdot (t_{fc,i} - t_{fc,o}) d\tau}{\int_0^{\tau_{end}} N_{fc} \cdot d\tau + \sum_{j=1}^m \int_0^{\tau_j} \{ \dot{m}_{BHE} \cdot c_{BHE} (t_{BHE,o} - t_{BHE,i}) + N_{BHE} \} d\tau + \sum_{k=1}^m \int_0^{\tau_k} N_{hp} \cdot d\tau}.$$

Отоплителен режим със слънчево базирана термopомпа (СБТП)

Ефективността на системата при този режим се определя като съотношение на топлината, подведена към вентилаторния конвектор, и сумарната слънчева радиация в равнината на слънчевите колектори плюс електрическите мощности на термopомпата и циркулационните помпи през периода на изпитване:

$$(4.5) \quad \eta_{s,5} = \frac{\int_0^{\tau_{end}} \dot{m}_{fc} \cdot c_{fc} \cdot (t_{fc,i} - t_{fc,o}) d\tau}{\sum_{i=1}^n \int_0^{\tau_i} (I_{sc} \cdot A_{ab} + N_{sc}) d\tau + \sum_{l=0}^p \int_0^{\tau_l} N_{AES} d\tau + \int_0^{\tau_{end}} (N_{2-3} + N_{fc} + N_{ev}) d\tau + \sum_{f=0}^q \int_0^{\tau_f} N_{hp} d\tau},$$

където: m_{st} е масата на водата в акумулаторите, kg;

\dot{m}_{BHE} , \dot{m}_{fc} , \dot{m}_{ev} , \dot{m}_{sc} - среден масов дебит на флуида през ВТО, вентилаторния конвектор, изпарителя и слънчевите колектори, kg/s;

c - среден масов специфичен топлинен капацитет на флуида, J/kgK;

$t_{st,end}$, $t_{st,in}$ – крайна и начална температура на водата в акумулатора, °C;

Оценяване на смесени уредби с алтернативни източници на енергия

$t_{BHE,i}$, $t_{BHE,o}$ - входяща и изходяща температура на флуида в/ от ВТО, °C;

$t_{fc,i}$, $t_{fc,o}$ - входяща и изходяща температура на флуида в/ от вентилаторния конвектор, °C;

$t_{ev,i}$, $t_{ev,o}$ - входяща и изходяща температура на флуида в/ от изпарителя, °C;

A_{ab} - площ на абсорбера на ПВСК, m^2 ;

I_{sc} - интензитет на сумарната слънчева радиация в равнината на ПВСК, W/m^2 ;

N_{sc} , N_{2-3} - моментна мощност на циркуляционната помпа в слънчевия кръг и мощност на циркуляционната помпа между акумулаторите с обем $200 dm^3$ и $300 dm^3$, W;

N_{BHE} - моментна мощност на помпата в кръга на ВТО, W;

N_{fc} - моментна мощност на циркуляционната помпа във водния кръг на вентилаторния конвектор, W;

N_{hp} - моментна електрическа мощност на термopомпата през периода на нейната работа, W;

N_{ev} - моментна електрическа мощност на циркуляционната помпа в кръга на изпарителя, W;

N_{AES} - моментна електрическа мощност в кръга на допълнителния източник на енергия (ДИЕ), в случая електронагревател, W;

n - брой на периоди на активност на помпата в слънчевия кръг, -;

τ_i - i -тия период от време на работа на помпата в слънчевия кръг, s;

τ - време (в началото на експеримента е 0), s;

τ_{end} - време в края на експеримента, s;

m - брой на периоди на активност на термopомпата и помпата в кръга на ВТО в режим на работа като ЗБТП,-;

τ_j - j -ият период от време на работа на помпата в кръга на ВТО, s;

τ_k - k -ият период от време на работа на термopомпата в режим на работа като ЗБТП, s;

τ_l - l -ият период от време на работа на допълнителния източник на енергия (ДИЕ), s;

p - брой на периоди на активност на ДИЕ, -;

q - брой на периоди на активност (цикли) на работата на термopомпата в режим на СБТП, -;

τ_f - f -ият период от време на работа на термopомпата в режим на СБТП, s.

4.5.2.2. Условия и режими на изпитване

Измерванията се извършват при квазистационарни условия:

- всички параметри се измерват едновременно всяка минута по време на периода на измерване;

- изпитваните слънчеви колектори са ориентирани към слънцето и наклонени към хоризонта под ъгъл ($\varphi - \delta$), където φ е географската ширина, а δ - деклинацията.

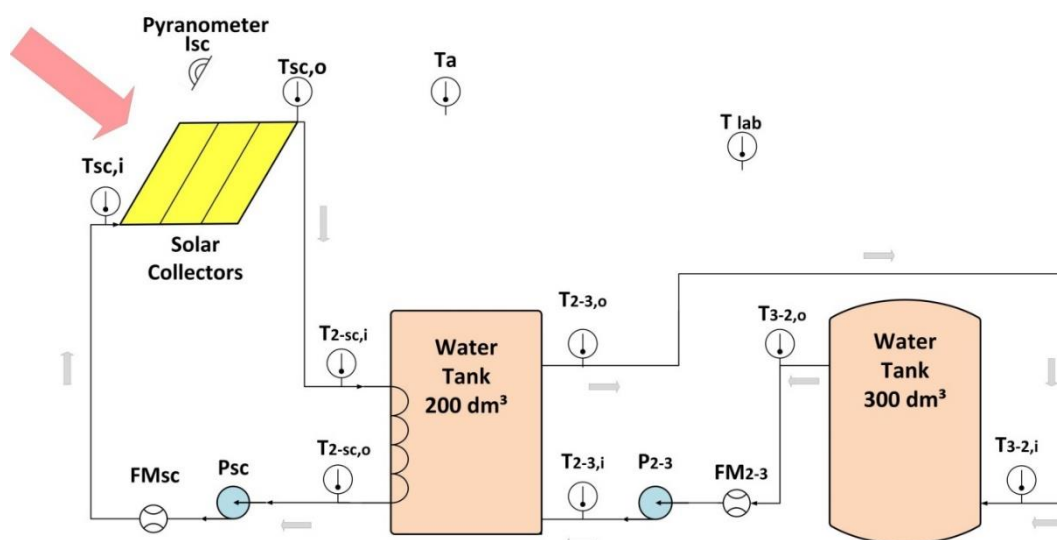
4.5.2.3. Точност на измерваните величини

Допустими отклонения на пряко измерваните величини:

- интензитет на глобалната слънчева радиация - $\pm 2\%$;
- температури - $\pm 2\%$;
- обемни дебити на флуида - $\pm 2\%$;
- електрическите мощности - $\pm 5\%$.

Допустими отклонения на косвено измерваните величини:

- кондензаторната мощност на термопомпата - $\pm 6\%$;
- пълен полезен топлинен поток, отведен от колектора - $\pm 6\%$;
- КПД на колектора - $\pm 6\%$;
- отоплителен коефициент (на трансформация) на термопомпата - $\pm 6\%$;
- КПД на системата при различните режими на работа - $\pm 6\%$.



Фиг.4.14. Работна схема на смесената уредба в режим на ЗВА

4.5.3. Експериментални резултати

4.5.3.1. Работни режими

Смесената уредба (Фиг.4.13) е изпитана при 5 различни работни режима в зависимост от сезонните условия и необходимото натоварване:

1. Зареждане на водни акумулатори с топлина от ПВСК (режим ЗВА): слънчевите колектори зареждат воден топлоакумулатор с топлина.
2. Зареждане на ВТО с топлина от ПВСК (режим ЗВТО): слънчевите колектори зареждат ВТО с топлина.
3. Директно слънчево отопление (режим ДСО): топлинна енергия от водния акумулатор се доставя директно на консуматора.
4. Отопление със ЗБТП (режим ОЗБТП): топлината се подава към изпарителя на термопомпата (ТП) от ВТО.

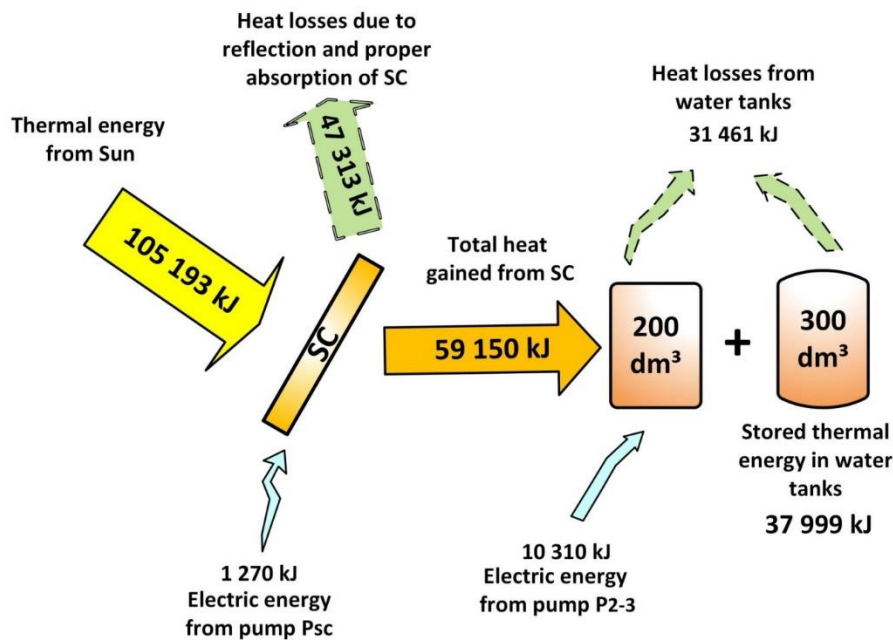
Оценяване на смесени уредби с алтернативни източници на енергия

5. Отопление със СБТП (режим ОСБТП): топлината се подава към изпарителя на термопомпата от слънчевите колектори.

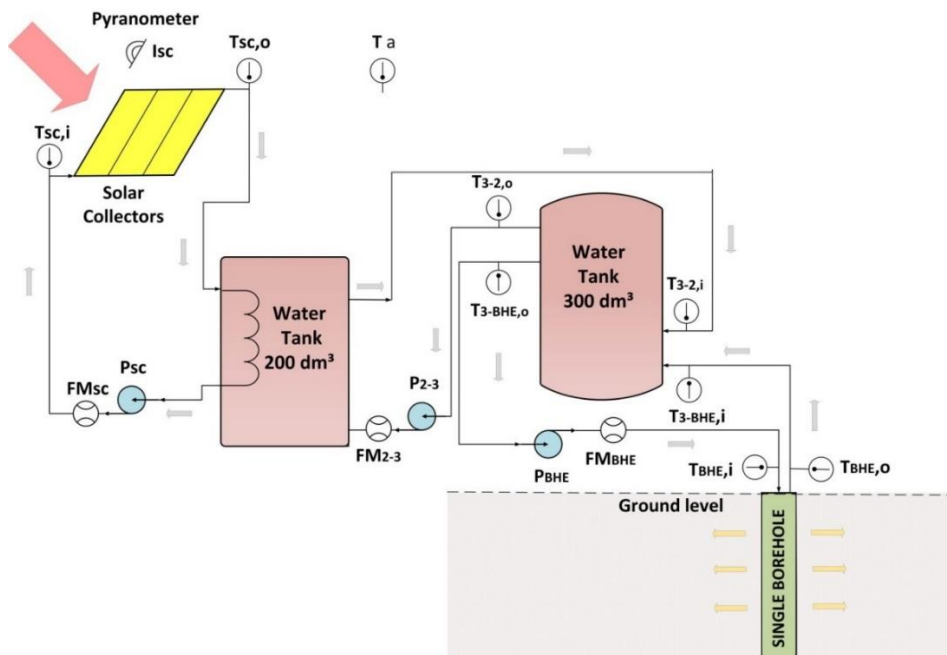
4.5.3.2. Зареждане на водни акумулатори с топлина от ПВСК (режим ЗВА)

Опростената работна схема на режима е представена на Фиг.4.14.

Проведен е експеримент с инсталацията в режим на ЗВА (Фиг.4.14). Енергийните потоци между компонентите на системата в този режим са показани на Фиг.4.15. Всички представени стойности се изчисляват въз основа на данните, получени по време на експеримента.



Фиг.4.15. Енергийна диаграма на режима ЗВА

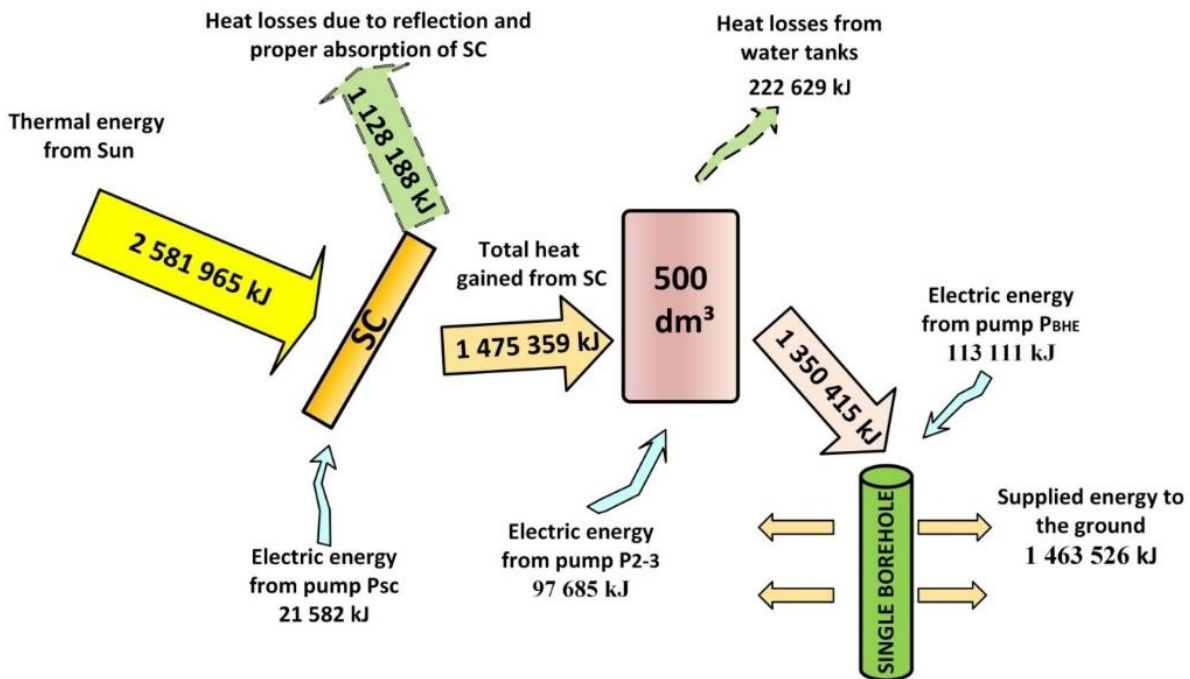


Фиг.4.16. Работна схема на смесената уредба в режим на ЗВТО

4.5.3.3. Зареждане на ВТО с топлина от ПВСК (режим ЗВТО)

Опростената работна схема на режима е представена на Фиг.4.16.

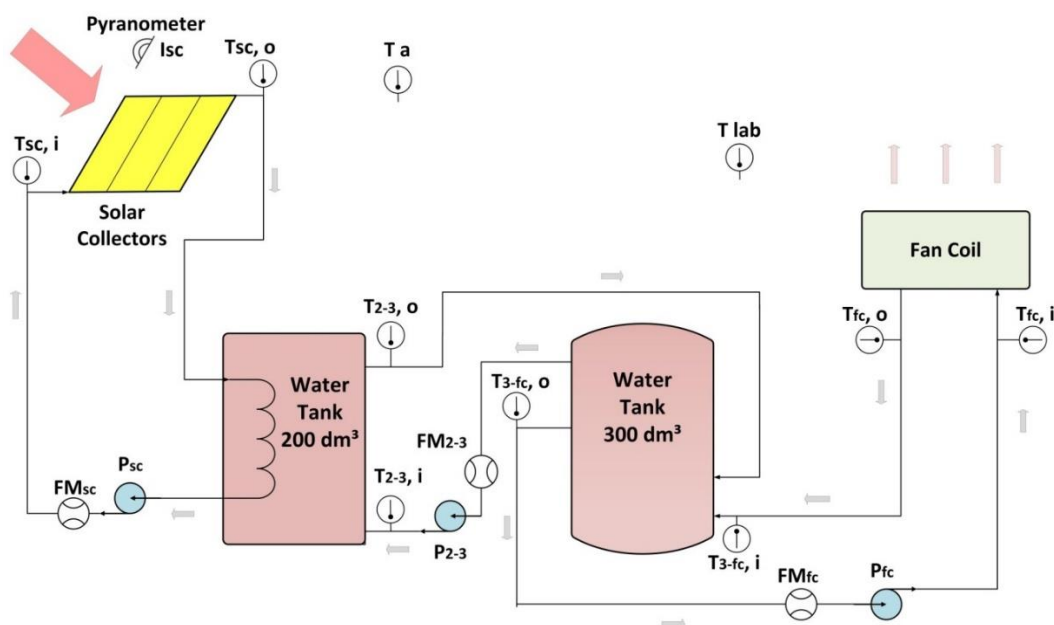
Проведен е експеримент с инсталацията в режим на ЗВТО (Фиг.4.16). Енергийните потоци между компонентите на системата в този режим са показани на Фиг.4.17. Всички представени стойности се изчисляват въз основа на данните, получени по време на експеримента.



Фиг.4.17. Енергийна диаграма на режима ЗВТО

4.5.3.4. Директно слънчево отопление (режим ДСО)

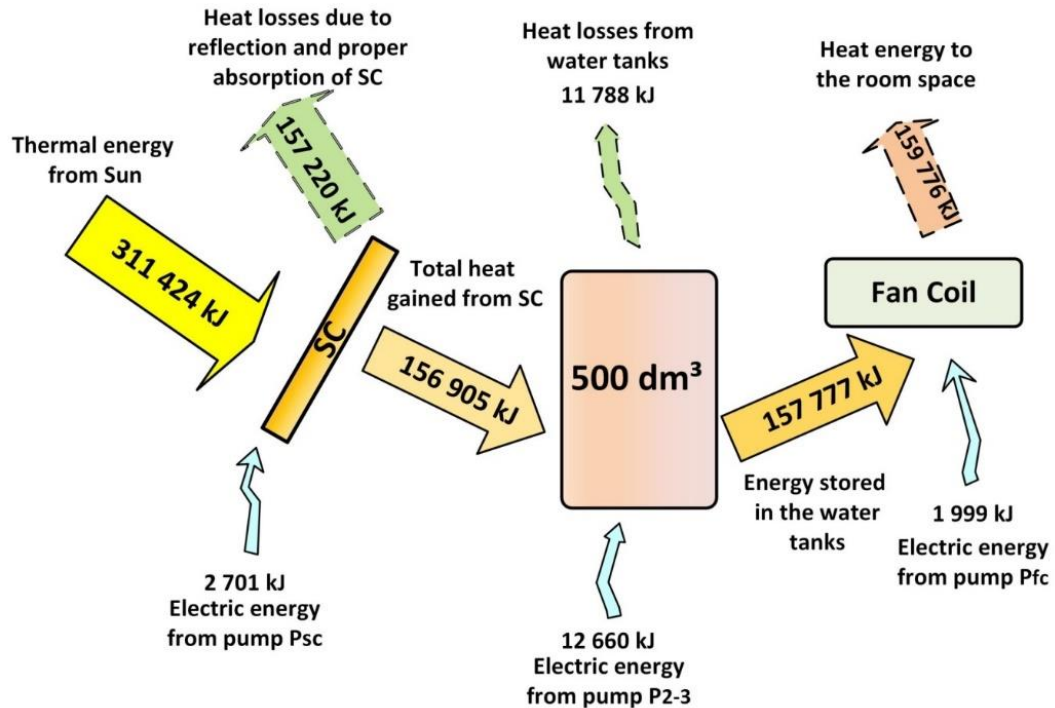
Опростената работна схема на режима е представена на Фиг.4.18.



Фиг.4.18. Работна схема на смесената уредба в режим на ДСО

Оценяване на смесени уредби с алтернативни източници на енергия

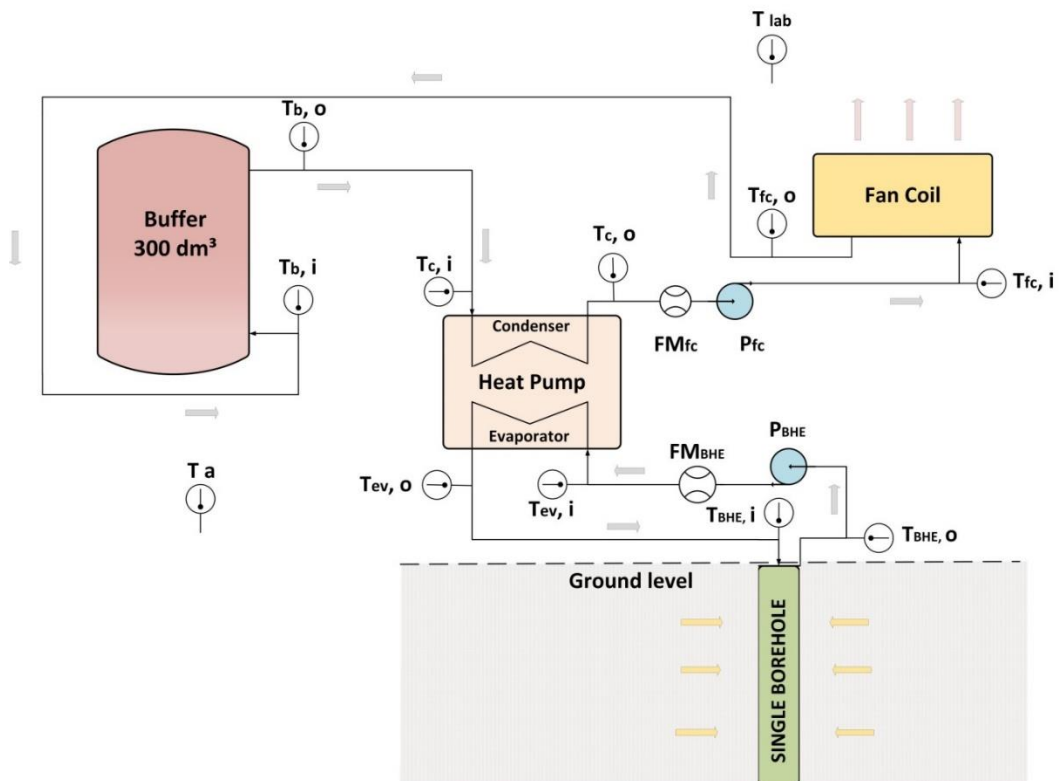
Проведен е експеримент с инсталацията в режим на ДСО (Фиг.4.18). Енергийните потоци между компонентите на системата в този режим са показани на Фиг.4.19. Всички представени стойности се изчисляват въз основа на данните, получени по време на експеримента.



Фиг.4.19. Енергийна диаграма на режима ДСО

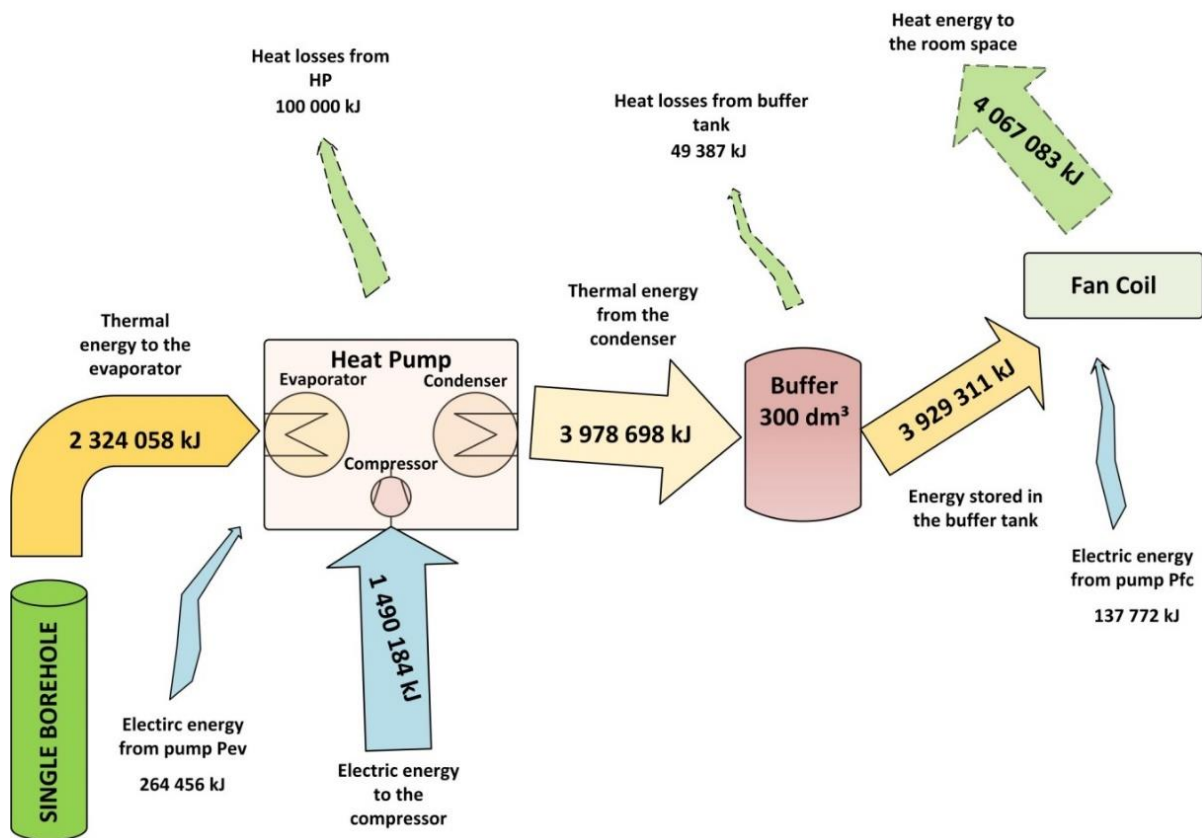
4.5.3.5. Отопление със ЗБТП (режим ОЗБТП)

Опростената работна схема на режима е представена на Фиг.4.20.



Фиг.4.20. Работна схема на смесената уредба в режим на ОЗБТП

Проведен е експеримент с инсталацията в режим на ОЗБТП (Фиг.4.20). Енергийните потоци между компонентите на системата в този режим са показани на Фиг.4.21. Всички представени стойности се изчисляват въз основа на данните, получени по време на експеримента.



Фиг.4.21. Енергийна диаграма на режима ОЗБТП

4.5.3.6. Отопление със СБТП (режим ОСБТП)

Опростената работна схема на режима е представена на Фиг.4.22.

Проведен е експеримент с инсталацията в режим на ОСБТП (Фиг.4.22). Енергийните потоци между компонентите на системата в този режим са показани на Фиг.4.23. Всички представени стойности се изчисляват въз основа на данните, получени по време на експеримента.

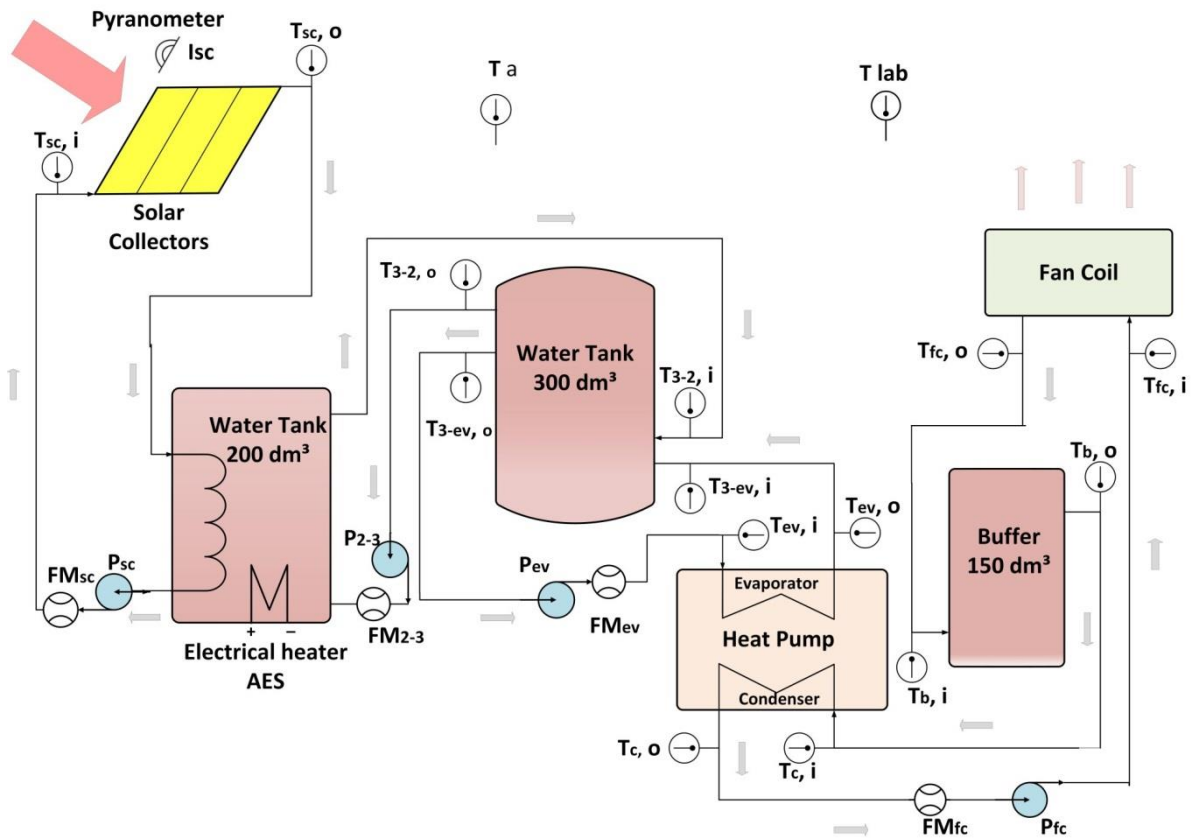
4.5.3.7. Анализ на грешката

Има три вида грешки, които могат да възникнат по време на експеримент: системни, случайни и динамични грешки. По време на изпитванията нямаше систематични грешки, тъй като всички измервателни уреди бяха калибрирани наскоро преди започване на измерванията. Динамични грешки по време на експеримента не бяха налице поради следните причини:

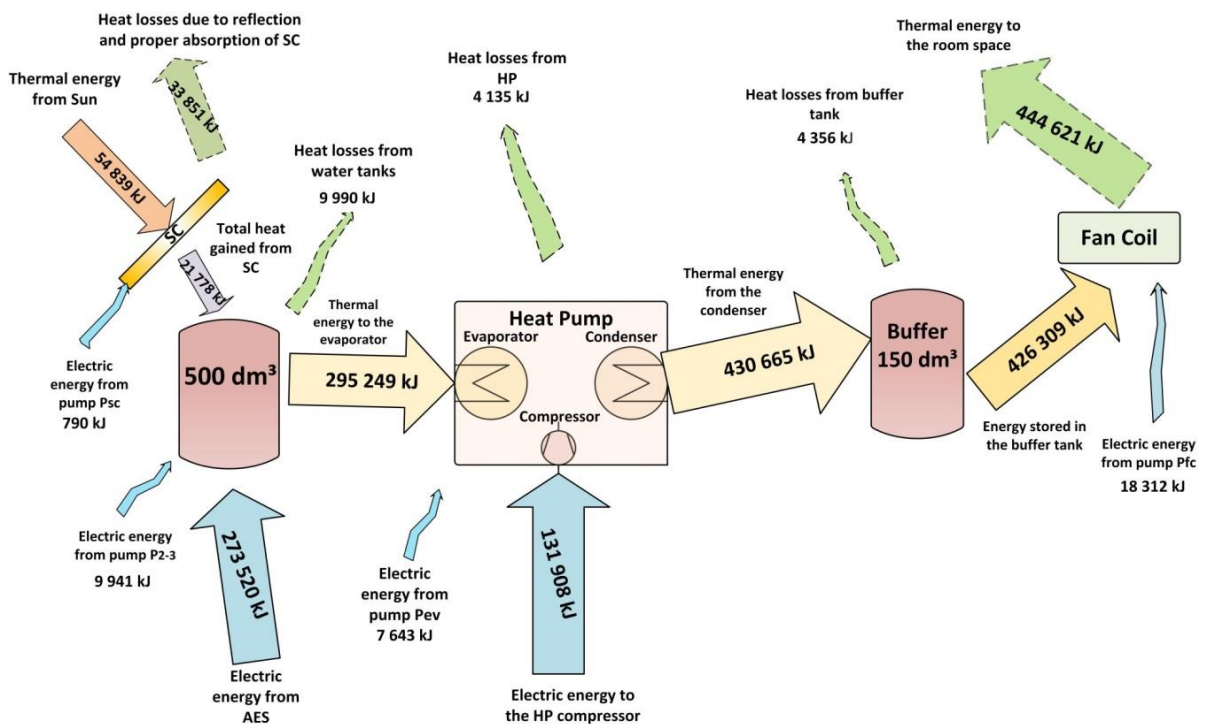
- измервателното оборудване е използвано в границите на допустимите работни условия на инструментите;

Оценяване на смесени уредби с алтернативни източници на енергия

- инсталацията е работила повече от час преди да започне отчитането.



Фиг.4.22. Работна схема на смесената уредба в режим на ОСБТП



Фиг.4.23. Енергийна диаграма на режима ОСБТП

Случайните грешки бяха оценени чрез регресионен анализ. Създадени са седем линейни модела за ефективността на слънчевия колектор η_{sc} , коефициента на трансформация на термopомпата COP_{hp} и петте системни КПД $\eta_{s,1}$, $\eta_{s,2}$, $\eta_{s,3}$, $\eta_{s,4}$, $\eta_{s,5}$ в зависимост от няколко фактора (интензитет на сумарната слънчева радиация, някои температури, масов дебит на флуида и електрически мощности). Относителните грешки на измерените параметри са по-малки от точността, представена в методиката за изследване по-горе.

Коефициентът на множествена корелация R и максималната абсолютна грешка бяха използвани като критерии за адекватност на оценките на модела. Получените стойности за параметрите на всички изпитвания напълно отговарят на изискванията на методиката за изследване.

Изводи към Глави 4.5.1-4.5.3

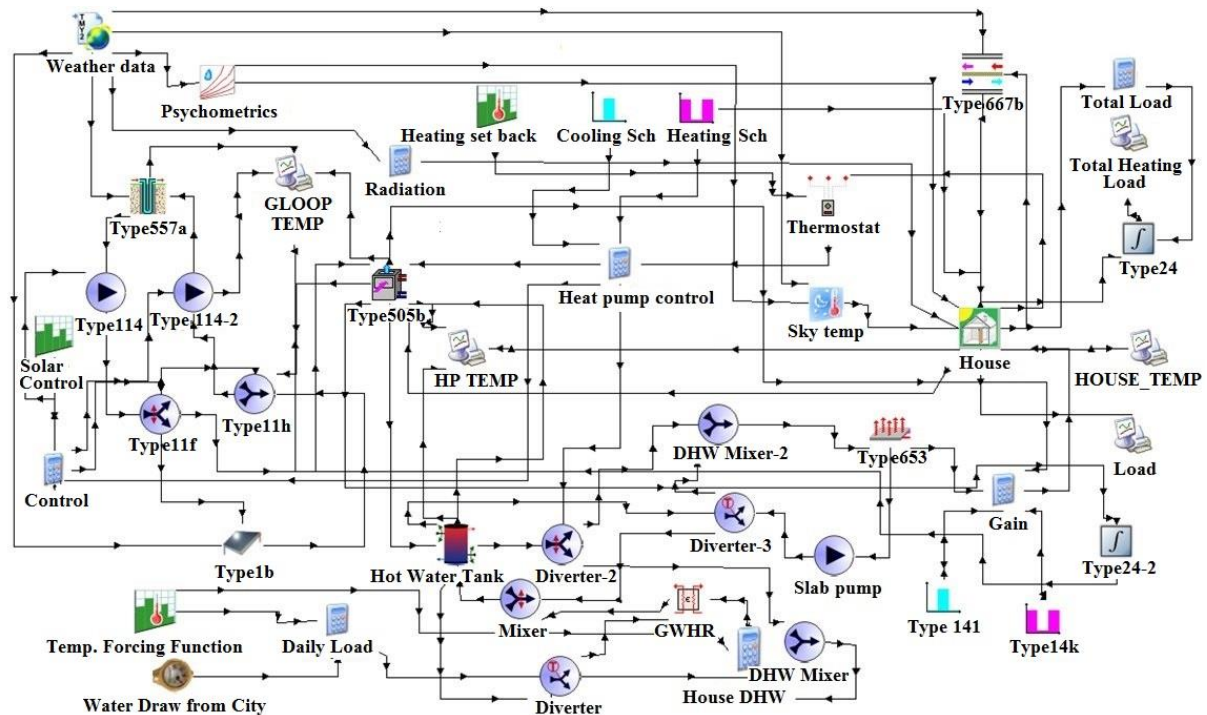
Смесената ЗБТП система със слънчеви колектори е изследвана опитно в пет режима на работа. Могат да се направят следните изводи:

1) Измерените стойности на интензитета на слънчевата радиация, падаща върху СК, надвишават нормалните стойности за Пловдив през летния период с около 25 %. Това се дължи на големия покривен панел с височина около 4 m. Така покривът играе ролята на концентратор без изображения. Препоръчва се използването на подобни покриви на сгради, като слънчевата радиация в равнината на колекторите ще бъде увеличена.

2) От получените резултати за температурите в двата резервоара за вода (200 dm³ и 300 dm³) може да се заключи, че температурите са еднакви. Не се наблюдава стратификация и те могат да се разглеждат като един резервоар за вода с обем 0,5 m³.

3) Температурата на земята се повиши с 1 до 2 °C по време на зареждащия режим ЗВТО в рамките на 1 месец. Измерванията показват намаляване на температурата на земята с 1,25 до 1,85 °C по време на режима ОЗБТП (при подобна продължителност на опита). Това доказва необходимостта от зареждане на ВТО с топлинна енергия от слънцето през лятото, за да се избегне изчерпването на топлината на земята.

4) Енергийната ефективност на системата за трите режима на отопление е изчислена - 48,59 % при режима ДСО, 96,46 % при режима ОЗБТП и 97,95 % при режима ОСБТП. Резултатите показват по-голяма ефективност на режимите с ТП. Но режимът ОСБТП е приложим за краткосрочно използване поради високите нужди от топлинна енергия получена от ПВСК (което води до големи капитални инвестиции и нужда от огромна площ за инсталиране). По този начин очевидно предимство има режим ОЗБТП в сравнение с другите два режима на отопление.



Фиг.4.24. Структурата на модела в TRNSYS Simulation Studio

4.5.4. TRNSYS симулации на къща захранвана от ЗБТП с ПВСК

4.5.4.1. Моделиране в “TRNSYS studio”

Създаден е симулационен модел на хибридна система за топлинно отопление и охлаждане, състояща се от слънчеви колектори, вертикални топлообменници и термопомпа. Моделът на системата е изграден в симулационната среда на „TRNSYS studio“ и позволява да се изследват различни режими на работа и да се анализира влиянието на системните параметри върху характеристиките на работата.

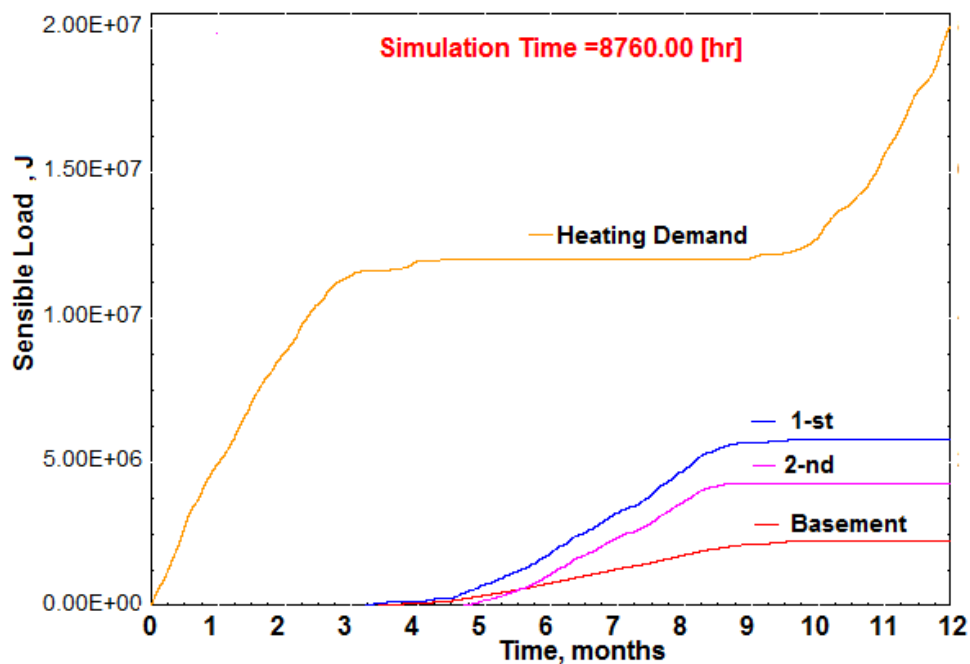
За симулация на системата беше използван комерсиалния софтуер TRNSYS. При изследване на различните системи трябваше да се определят следните параметри: отвеждането на топлина от земята; използването на електроенергия; най-ниските и средните температури на флуида, подведен към изпарителя; икономията на електроенергия; сезонния коефициент на ефективност (СКЕ) на системата и коефициента на трансформация (COP) на термопомпата. Фиг.4.24 показва пълния модел на смесената система, съставена в „TRNSYS Studio“.

4.5.4.2. Симулиране на топлинните товари на къща захранвана от ЗБТП с ПВСК

В това изследване енергийните симулации се извършват при наличие на неподвижни слънчеви колектори и ЗБТП. Моделът на къщата описва четири зони: мазе (обем на зоната 201 m^3), 1-ви етаж (обем на зоната 464 m^3), 2-ри етаж (обем на зоната 350 m^3) и таван (обем на зона 240 m^3). Основната част от отоплителната мощност се изразходва за две зони: 1-ви

етаж и 2-ри етаж. Таванското помещение не се отоплява. Мазето се отоплява, но при по-ниски температурни настройки на терморегулатора.

Общото потребление на топлинна енергия за къщата е изчислено чрез интегриране на мощността в различните зони и след това чрез сумиране. Приблизителните годишни стойности са показани на Фиг.4.25. Годишно за отопление на къщата е необходимо количество от 19,5 MJ. Изчислено е годишното потребление за охлаждане на първия, втория етаж и мазето, като отчетените стойности са съответно 5,8 MJ, 3,6 MJ и 2,2 MJ.



Фиг.4.25. Симулирани общи годишни потребления за отопление и охлаждане

Изводи към Глава 4.5.4

Изградена е смесена ЗБТП система със слънчеви топлинни колектори в Техническия университет в София, филиал Пловдив. Симулационният модел на такива системи е разработен в TRNSYS Simulation Studio. Направени са следните изводи:

1. Разработеният модел може да бъде полезен инструмент в процеса на проектиране на смесена система за отопление и охлаждане. Необходима е проста процедура, за да се приложи модела към всеки различен размер на системата и параметри на компонентите. Проектантът трябва само да промени: плоскостта на сградата и изискванията; вида, размера и параметрите на слънчевите колектори, ВТО; термопомпата и метеорологичните данни.

2. Преди това трябва да се извърши ОТХ с цел валидиране на параметрите на модела на ВТО.

3. Необходими са допълнителни експериментални работи във всеки проект за валидиране на параметрите на модела.

4. Симулирането на енергията на системата, извършено от модела, позволява на проектанта да оптимизира размера на компонентите на системата и да намали разходите.

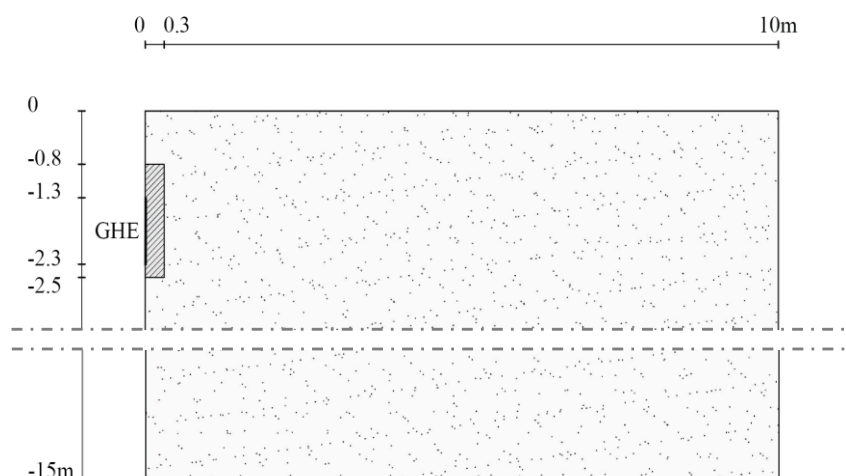
4.6. ЗЕМНО БАЗИРАНА ТЕРМОПОМПЕНА (ЗБТП) УРЕДБА ИЗПОЛЗВАЩА МАТЕРИАЛИ С ПРОМЯНА НА ФАЗОВОТО СЪСТОЯНИЕ (МПФС)

Предложено е свързването между материали с промяна на фазовото състояние смяна (МПФС) и земни топлообменници (ЗТО) с цел да се анализират потенциалните ползи за пестене на енергия при проблем с нестационарно топлопренасяне на ЗБТП при отопление и охлаждане на помещения. Микро-капсулиран парафин и вода се приемат като МПФС, които се смесват директно с материала за запълване, заобикалящ ЗТО.

В 2D област се приема, че ЗТО с плосък панел работи в съответствие с часовите натоварвания за отопление и охлаждане на опростен модел сграда, снабден със ЗБТП. Изменението на температурата на въздуха във функция на времето е получена според графика за включване/ изключване на термопомпата, за да се доближи до реалистичен случай.

4.6.1. Област на модела

Областта на модела разглежда напречно сечение, което включва слой с МПФС и обширна заобикаляща част от почвата. Слой с МПФС, (както бе описано по-горе) е смес от микрокапсулиран парафин, вода и почва с определени съотношения на масата. Беше разгледан симетричен подход така, че половината от областта да може да бъде анализирана, за да се намали изчисляването на крайните елементи. Предполага се, че ЗТО е плосък панел, който е с висок коефициент на топлопреминаване. Това е лесно да се възпроизведе в 2D подхода, поради което плоският панел се въвежда като гранично условие на числената област.

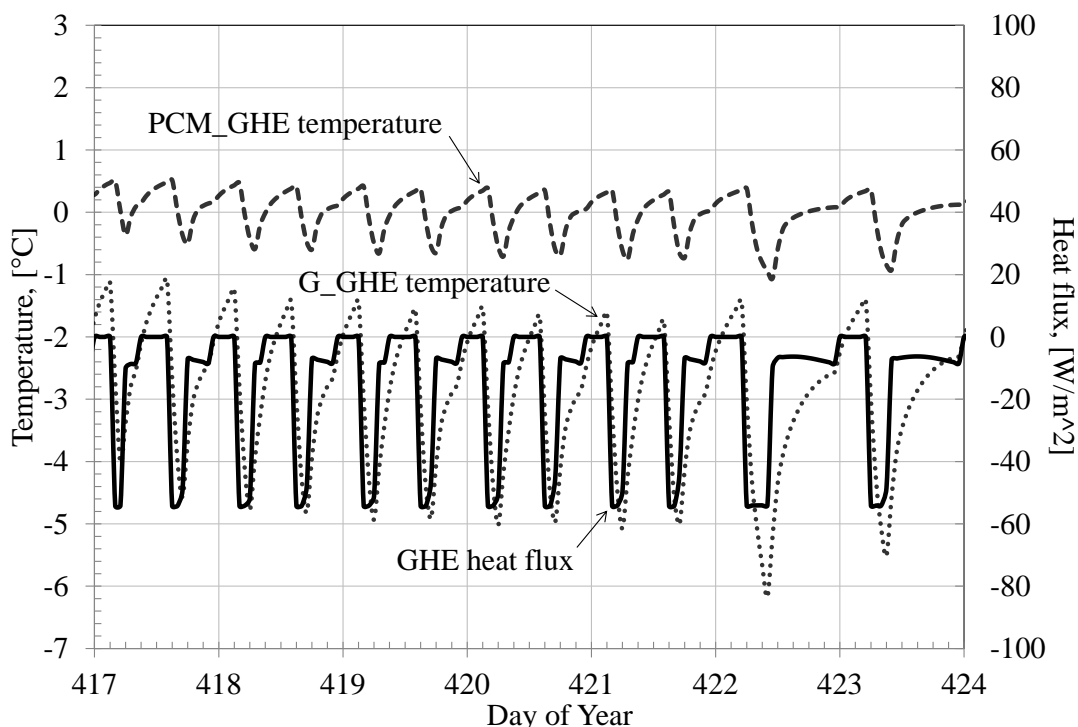


Фиг.4.26. Скица на половин симетрична област на модела

Фиг.4.26 показва размерите на разгледаната област (половината от реалната) - ширина 10 m и дълбочина 15 m. ЗТО е висок 1 m и е разположен на дълбочина между 1,3 и 2,3 m. Слой от МПФС е поставен между 0,8 и 2,5 m дълбочина. Приема се, че дебелината му е равна на 0,30 m, а полученият обем от слой с МПФС за всеки метър на единица дължина плосък панел е $0,45 \text{ m}^3$. Размерите са избрани да бъдат подобни на тези от полевия опит, който се тества в катедрата по архитектура на Университета във Ферара, Италия, с цел сравняване на моделирането с експерименталните резултати.

4.6.2. Симулации

За да се сравни въздействието на МПФС върху температурното поле на почвата и след това върху температурата на работния флуид в ЗТО, случаите със и без МПФС са решени за симулационен период от две години. Втората година е изпълнена за проверка на сезонните периодични колебания и за оценка на топлинното отклонение, предизвикано от ЗТО. Всъщност топлинният поток, фиксиран върху повърхността на почвата, не отчита топлинното въздействие на работата на ЗТО, тъй като той е допълнително (обратно) изчислен с модел базиран на фиксирана температура върху повърхността. Следователно трябва да се очаква, че годишната крайна температура на температурното поле може да е различна от първоначалната. Независимо от това, ако същата разлика в температурата се появи и през втората година на симулация, може да се заключи, че моделът е в стационарна тенденция.



Фиг.4.27. Симулирани температури във функция на времето и обменен топлинен поток за една седмица през зимата

Оценяване на смесени уредби с алтернативни източници на енергия

Проверено е, че температурата на земята на дълбочина 1,8 m и на 10 m от ЗТО се променя с 0,3 °C както в края на първата година, така и в края на втората (единствено поради работата на ЗТО). С това приближение резултатите от симулацията се обсъждат, както е посочено по-долу.

Както е показано на Фиг.4.27, резултатите от симулацията за една седмица са избрани да изобразяват дневните промени на температурите във функция на времето по стената на ЗТО и за двата случая, както и съответния топлинен поток. Тук различното поведение е подробно описано както през зимата, с доказателства за най-трудната седмица по отношение на температурата. Случаят с МПФС показва средни температури по стената на ЗТО с до 5K по-високи от случая без МПФС през седмицата (422 и 423 DOY). Това съответства на доста по-различна работа на термопомпата и може да позволи използването на вода като работен флуид без добавяне на гликол.

Изводи към Глава 4.6

Като резултат на проведените изследвания могат да се направят следните изводи:

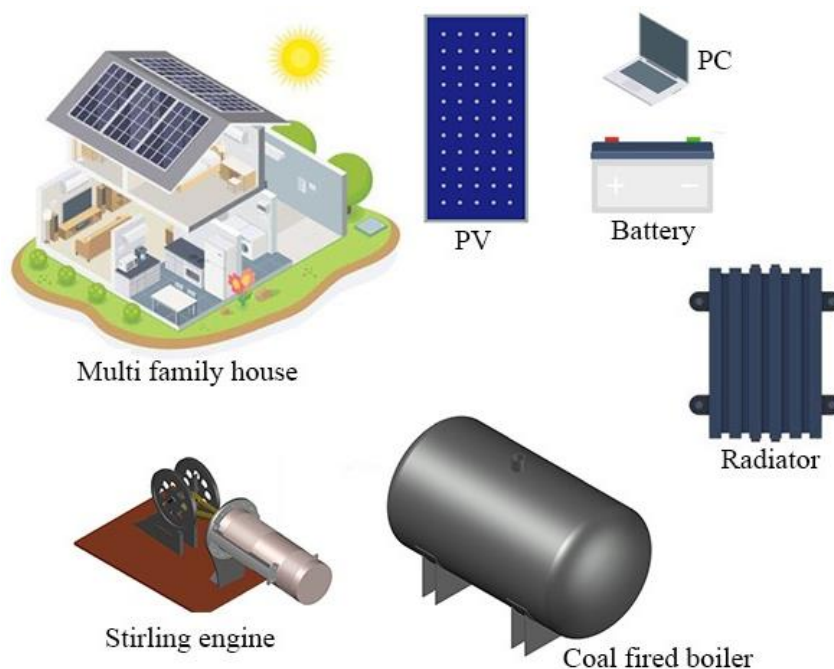
- В сравнение със случая без МПФС, повърхностните температури на ЗТО (съчетани с МПФС), биха могли да бъдат с няколко градуса по-високи през зимата или по-ниски през лятото. Това означава потенциално увеличение на коефициента на трансформация на термопомпата. Освен това е налице интересният ефект от изглаждането на температурната крива, причинена от работата на термопомпата (намаляването на рязкото колебание при отопление или охлаждане на земния теплообменник).

- Представеният замисъл показва нова възможност за хоризонталните плитки ЗТО. За разлика от вертикалните и дълбоки ВТО се смята, че е неподходящо да се прави опит за подземно акумулиране на топлинна енергия с плитки ЗТО, тъй като почвата около него се влияе по-силно от околната среда през различните сезони.

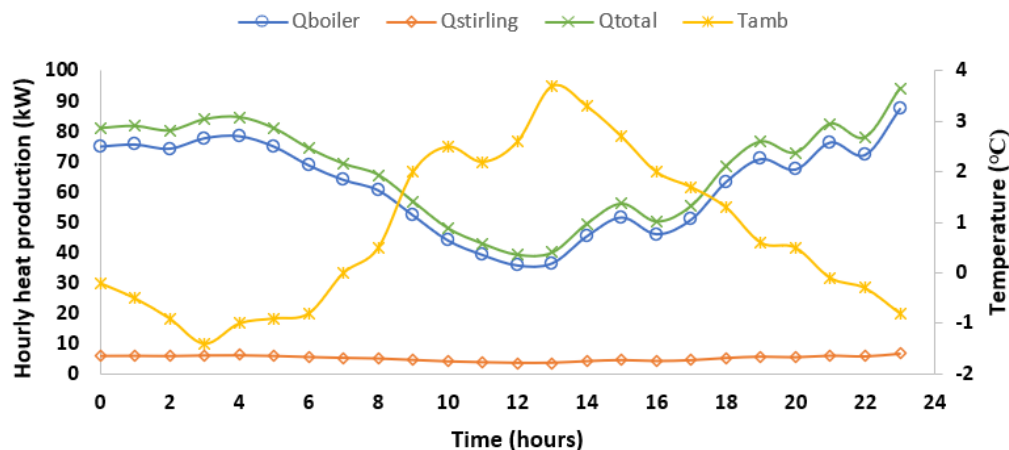
4.7. СМЕСЕНА МИКРО-КОГЕНЕРАЦИОННА СИСТЕМА С ФОТОВОЛТАИЧНИ ПАНЕЛИ И СЪРЛИНГ ДВИГАТЕЛ ЗА ЛОКАЛНО ОТОПЛЕНИЕ

Микро-когенерационната уредба е много подходяща технология като система за производство на топлинна и електрическа енергия предимно за селските и отдалечени райони. Разгледана е едновременната работа на двигател на Сърлинг и фотоволтаични (PV) панели за производство на електричество от централна отоплителна система на твърдо гориво. Термодинамичните характеристики на смесената система са изследвани експериментално (Фиг.4.28). Тя има за цел да изпълнява основното си предназначение на централна отоплителна система и същевременно да

задоволява консумацията на електроенергия на бойлера или да снабдява жилището с електричество. Механичната енергията, осигурена от двигателя на Стърлинг в котела, се преобразува в електрическа енергия с алтернатор и се подготвя за използване, като се акумулира в батерия заедно с енергията, идваща от фотоволтаичните панели.



Фиг.4.28. Схематично представяне на фотоволтаично базирана микро когенерационната система



Фиг.4.29. Изменение на производството на топлина и околната температура във функция на времето (h)

Производство на топлина от котела на въглища, двигателя на Стърлинг, микро-когенерационна система и температурата на околния въздух във функция на времето (в часове) са представени на Фиг.4.29. Дневното производство на топлинна енергия от котела на въглища, Стърлинг двигателя и микро-когенерационна система е съответно 1489,8, 124,2 и 1614 kW. Когато температурата на околния въздух се повиши,

Оценяване на смесени уредби с алтернативни източници на енергия

разликата в температурата на водата на входа и изхода на отоплителната система намалява. Q_{boiler} намалява вследствие спада на температурната разлика на температурата на изходящата вода на отоплителната система на сградата T_2 и температурата на изходящата вода от котела T_1 . Дневното производство на електроенергия от двигателя на Стърлинг и PV панелите е съответно 3,6 kW и 0,36 kW.

Изводи към Глава 4.7

Следните изводи могат да се направят от проведените изследвания:

- Общото производство на електроенергия от PV панела и двигателя на Стърлинг се мени в границите между 121,3 и 244,6 W;
- Отопление на сграда с когенерационна система се предлага за селските и откъснати райони, където няма електричество. Генерираната електроенергия се съхранява в батерии, за да се посрещне нуждите от електроенергия на оборудването на спомагателната система;
- Микро-когенерационна система беше комбинирана с PV модул, целейки увеличаване на собственото производство от електроенергия за нуждите на инсталацията.

5. ОБЩИ ИЗВОДИ

Изводите от направените изследвания са отразени на подходящите места в Глава 3 и 4. Тук са обсъдени общите изводи, свързани с оценяването на различните смесени уредби с Алтернативни енергийни източници (АЕИ).

В дисертацията бяха разгледани някои разновидности на смесени инсталации с АЕИ, както и техните компоненти. Ето накратко най-важните особености на представените смесени уредби:

1. Вакуумни слънчеви колектори с топлинна тръба, комбинирани с воден акумулатор:

- Изходящата температура на флуида от тази инсталация може да достигне до температура над 100 °C и така да бъде източник на топлина за генератори на абсорбционни хладилни машини например.

2. Хладилна инсталация с вградени слънчеви колектори и топлоакумулатор:

- Внедряване на термopомпа повишава ефективността на слънчева инсталация, която да работи и през зимата;

- Уредбата е подходяща за използване в хранително-вкусовата, фармацевтичната, биотехнологичната и др. промишлености, където има нужда както от отопление, така и от охлаждане.

3. Вертикален топлинен енергиен акумулатор (ВТЕА) със слънчеви колектори:

- ВТЕА е почти универсален и независим от околната среда;

- Зареждането на ВТЕА от слънчеви колектори (или отпадъчна топлина) води до използване на земята не само като източник на енергия, но и като акумулатор на топлина.

4. Фотоволтаично-топлинни (PV/T) инсталации:

- Инсталиране на места, където площта е ограничена (това води до намаляване на инсталационните разходи);

- Елементарно преобразуване на PV в PV/T панел води до производство на електрическа и топлинна енергия, като производството на електроенергия се повишава при направеното охлаждане;

- Концентриращите PV (CPV) устройства увеличават падащата слънчева радиация върху PV повърхността и намаляват фотоволтаичния материал за единица приемник.

5. Земно базирана термopомпена (ЗБТП) система със слънчеви колектори:

- Земно базираните термopомпени (ЗБТП) системи използват земята като огромен топлинен източник, като термopомпата помага топлината да се предаде на по-високо ниво;

- Чрез ЗБТП може да се постига както отопление и производство на топла вода за битови нужди, така и охлаждане;

- Комерсиалните софтуери TRNSYS и EED са полезен инструмент в процеса на проектиране.

6. ЗБТП уредби използващи материали с промяна на фазовото състояние (МПФС):

- Смесването на МПФС директно с почвата в комбинация със ЗБТП води до изглаждането на температурната крива, причинена от работата на термopомпата.

7. Смесена микро-когенерационната система с фотоволтаични панели и Стърлинг двигател за локално отопление:

- Микро-когенерационните системи (осигурявайки топлина и електричество едновременно) с фотоволтаични панели и Стърлинг двигател (произвеждащи електричество за собствени нужди) за локално отопление са подходящи за захранване на отделни сгради, намиращи се в селски или откъснати райони.

Две уредби се очертават като най-перспективни технологии:

Системите, използващи МПФС, защото:

- Са подходящи за приложение както в химическите, така и в биохимичните технологии;

- Са изключително удобни поради голямото разнообразие на точки на топене.

ЗБТП системите, защото:

- Термopомпата подвежда енергия на по-високо ниво от първоначалното - ефективностите на отопление със Слънчево базирана

Оценяване на смесени уредби с алтернативни източници на енергия

термопомпа (ОСБТП) и отопление със ЗБТП (ОЗБТП) са доста по-високи от този на директно слънчево отопление (ДСО);

- Земята е безкраен топлинен източник когато се използва като акумулатор;

- Сравнението между Слънчево базирана термопомпа (СБТП) и ЗБТП води до извода за очевидно предимство на ЗБТП предвид както дългосрочното ѝ използване, така и липсата на големи капитални разходи и нуждата от огромна площ за инсталиране на слънчеви колектори (което е налично при СБТП система).

Комбинацията между тези две системи е изключително атрактивно (вече показано в т.6 по-горе).

Ето най-важните изводи относно смесените топлинни уредби с АЕИ:

1. Правилният избор на компонентите води до добре проектирана смесена топлинна уредба.

2. Необходим е подбор на нови и по-ефективни материали в елементите на системата.

3. Създаването и валидирането на математически модели позволяват симулиране на различни смесени уредби и режими на работа, спомагащи по-правилното проектиране.

4. Оптимизацията на режима на вече познатите смесени уредби по отношение на различните климатични условия води до правилния избор на конкретната смесена уредба.

6. ОСНОВНИ ПРИНОСИ

Представени са основните приноси на автора в дисертационния труд. Те са обособени в три раздела - НАУЧНИ, НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ или ПРИЛОЖНИ.

6.1. НАУЧНИ ПРИНОСИ

1. Изследван е подробно (чрез експеримент и математическо моделиране) вакуумен слънчев колектор с топлинна тръба. Впоследствие е създадена компютърната програма, с която са проведени симулации при различни режими.

2. Направени са опитни изпитания на смесителен воден акумулатор с разслояване на работния флуид. С подобрения математически модел е създадена компютърна програма, способстваща верифицирането му на базата на проведените експерименти.

3. Индустриален воден акумулатор с две отделни серпентини е изследван експериментално и е избран математически модел, описващ работата му. Верифицирането на модела се извършва с помощта на създадената компютърна програма.

4. Изградени са три различни инсталации (една стационарна в Чили, една мобилна с електронагревател в България и една с термопомпа в Испания) за провеждане на новия ефективен тест Определяне на топлинни характеристики (ОТХ). Построени са Вертикални топлообменници (ВТО) във Валпарайсо, Чили и Пловдив, България, където са проведени ОТХ за определяне на топлинните свойства на почвата. Получените резултати са обработени с различни математически методи. Направени са симулации с комерсиалния софтуер TRNSYS, сравнявайки изчислените стойности с опитните данни. Предвидено е създаване на кадастър в България, който да бъде използван в бъдещи геотермални проекти.

5. Латентен акумулатор използващ материали с промяна на фазовото състояние (МПФС) е проектиран и изграден в ТУ София, филиал Пловдив, който е оборудван със специализирана автономна измервателна система, разработена от научния екип в Пловдив. Изследвани са няколко вида парафин, чиито топлотехнически свойства бяха детайлно изследвани. Проведено бе математическо моделиране и симулиране на процесите в акумулатора по два различни начина - чрез метод на крайните елементи, базиран на мултифизиката на Comsol, и чрез техниката на енталпийната поръзност, използвана в ANSYS Fluent.

6.2. НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

1. Смесена уредба, съдържаща вакуумни слънчеви колектори с топлинна тръба и воден топлоакумулатор с четворна серпентина, е изследвана експериментално. Създаденият общ математически модел, описващ съвместната работа на двата елемента, е запрограмиран и верифициран на базата на проведени опити.

2. Изградената инсталация за извършване на ОТХ в Чили е преустроена за провеждане на натурални експерименти на зареждане със слънчева енергия на подземните акумулатори и на разреждане. Проведени бяха дългосрочни експерименти при двата споменати режима. Направено бе сравнение между пресметнатите стойности с комерсиалния продукт TRNSYS и измерените стойности при процеса на зареждане и разреждане, като резултатите показаха добро съвпадение.

3. Проектирана и изработена е слънчева топлинна уредба, комбинирана с фотоволтаични панели. Разработен и доказан е нов набор от виртуални инструменти, осигуряващи он-лайн или оф-лайн изчисления на грешката при извършване на експерименти. Направените опити охарактеризираха енергийната ефективност на евтината конструкция от PV/Г панел и спомогнаха за проверка на правилната работа на разработените виртуални инструменти.

4. Земно базирана термопомпена (ЗБТП) уредба бе подробно експериментално изследвана при следните пет режима на работа на системата: зареждане на водни акумулатори (ЗВА), зареждане на

Оценяване на смесени уредби с алтернативни източници на енергия

вертикални топлообменници (ЗВТО), директно слънчево отопление (ДСО), отопление чрез ЗБТП (ОЗБТП) и отопление чрез слънчево базирана термopомпа (ОСБТП). Направен бе подробен енергиен анализ при споменатите режими, като бяха отчетени всички енергийни източници и пресметнати съответните загуби и системните коефициенти на енергийна ефективност за всеки режим.

5. При изграждането на ВТО на ЗБТП уредба бяха монтирани през 10 m температурни сензори по дълбочина за следене изменението на температурното поле. Получени бяха диаграми, потвърждаващи нагриването (при зареждане – режим ЗВТО) и изстиването (при отопление - ОЗБТП) на почвения слой в течение на времето. Проведено бе и измерване на температурното поле след приключване на двата режима при така наречената естествена релаксация.

6. Създаден бе модел, изграден в симулационната среда на „TRNSYS studio“, който позволява да се изследват различни режими на работа на ЗБТП система и да се анализира влиянието на системните параметри върху характеристиките на работата. Обърнато бе внимание на следните елементи от системата: слънчев колектор, воден акумулатор, термopомпа, вентилация и къща. С така създадения модел бе направено симулиране на къща, отоплявана от тази инсталация.

7. Представено е числено моделиране, оценяващо нов вид конструкция за приложението на МПФС в подземни хоризонтални топлообменници (ЗТО), интегрирани към земно базираните термopомпи (ЗБТП). МПФС е смесен директно с почвата около ЗТО – това е нов подход, не изследван досега за хоризонтални топлообменници. Резултатите показват, че обединяването на МПФС със ЗТО посреща ефективно топлинните товари на ЗБТП и намалява рязкото колебание при отопление или охлаждане на земния топлообменник. Проведените симулации са за случаи със и без МПФС, решени за симулационен период от две години.

6.3. ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

1. Предложено е повишаване ефективността на слънчева инсталация, която да работи и през зимата, чрез внедряване на термopомпен агрегат. Създадена е методика за пресмятане на параметрите на уредбата, с която впоследствие са извършени примерни изчисления.

2. Съществуващ фотоволтаичен (PV) панел е преобразуван във фотоволтаично-топлинен (PV/T) панел. Извършени са сравнителни експерименти на смесената инсталация (състояща се от двата различни панела), доказващи предимството на комбинирания PV/T елемент, произвеждащ при охлаждане както повече електроенергия, така и допълнително топлинна енергия.

3. Създадена е концентрираща фотоволтаична-топлинна (CPV/T) уредба, която е свързана с изпарителя на термopомпа (ТП) - PV модулите се охлаждат чрез хладилния агент, минаващ през изпарителя на ТП. Инсталацията е проектирана за отопление на сгради. Проведено е теоретично и експериментално изследване, показващо ефективното производство на електричество и топлина с описаната уредба.

4. Създадена е нова конструкция на смесена земно базирана термopомпена (ЗБТП) уредба, съставена от два вертикални топлообменника, три плоски водни слънчеви колектора (ПВСК), реверсивна термopомпа (ТП) и вентилаторен конвектор. Разработена е методика за определяне на топлотехническите характеристики при следните пет режима на работа: ЗВА, ЗВТО, ДСО, ОЗБТП и ОСБТП.

5. Изследвана е теоретично и експериментално едновременната работа на двигател на Стърлинг и фотоволтаични (PV) панели за производство на електричество от централна отоплителна система на твърдо гориво, целяща както да отоплява сградите, така и да задоволява консумацията на електроенергия на бойлера или да снабдява жилището с електричество. Отоплителният капацитет на многофамилна къща в Мугла/Турция беше осигурен с микро-когенерационна система, като експериментът беше проведен в рамките на три месеца.

7. ПУБЛИКАЦИИ НА АВТОРА В ПЪЛЕН ТЕКСТ ПО ДИСЕРТАЦИЯТА

- [1] Георгиев, А., М. Джауад. Пресмятане температурното поле на флуида в смесителен акумулатор със стратификация. Изв. на ВМЕИ – София, 43, 1989, № 3, с. 47 – 52.
- [2] Картелов, Г., А. Георгиев. Повишаване ефективността на хладилна инсталация чрез вграждане на системата слънчеви колектори – топлоакумулатор. Теор. и прил. механика: Докл. VI нац. конгр. по теор. и прил. механика, Варна 1990: Кн.3. 3 секция, Хидродинамика, топло- и масообмен, стр. 117-120.
- [3] Георгиев, А., С. Бързилова, Я. Картелов. Конструкция на мобилна инсталация за измерване топлинни свойства на земята. Топлотехника за бита, № 5/6, 2007, стр. 26 – 30.
- [4] Georgiev, A. Mathematisches Modell eines Vakuumsolarkollektors mit Wärmerohr und Flachabsorber. BWK. Brennstoff, Wärme, Kraft, 1993, № 12, p. 527-534 (**IF: 0,62**).
- [5] Georgiev, A. Mathematische Modellierung eines Warmwasserspeichers mit vierfachen Rohrwendeln. Elektrowärme international. Part A, ETA, 1995, № 3, p.132-134 (**международ. списание**).

- [6] Georgiev, A. Bestimmung der Hilfsparameter des mathematischen Modells eines Warmwasserspeichers mit vierfachen Rohrwendeln. J. of the Technical Univ. at Plovdiv, 4, 1996, p. 263-271.
- [7] Georgiev, A. Experimentelle Untersuchung eines Vakuumsolarkollektors mit Wärmerohren und Flachabsorber. J. of the Technical Univ. at Plovdiv, 4, 1996, p. 273-278.
- [8] Georgiev, A. Versuchsaufbau und Untersuchung einer Anlage von Vakuumsolarkollektoren mit Wärmerohren und Warmwasserspeicher. J. of the Technical Univ. at Plovdiv, 5B, 1997, p. 40-49.
- [9] Georgiev, A. Mathematical modelling of a System Vacuum Solar Collectors – Warm Water Storage. J. of the Technical Univ. at Plovdiv, 5B, 1997, pp.71-80.
- [10] Ortiz, A., Georgiev, A., Roth, P. (2002). Ground Thermal Properties Study for BTES Applications - World and Chilean Review. Proceedings of Int. Solar Energy Congress "Sun at the End of the World", Chile, Valparaíso, 28 - 31 October, 2002 (**международ. конгрес**).
- [11] Busso, A., A. Georgiev, P. Roth. Underground Thermal Energy Storage - First Thermal Response Test in South America. Proc. of the Int. Congress "RIO 3 - World Climate and Energy Event", 1 - 5 December 2003, Rio de Janeiro, Brazil, p. 189 – 196 (**международ. конгрес**).
- [12] Roth, P., A. Georgiev, A. Busso, E. Barraza. First In-situ Determination of Ground and Borehole Thermal Properties in Latin America. Renewable Energy, 2004, V. 29 (12) p. 1947-1963 (**IF: 0,607**).
- [13] Busso, A., A. Georgiev, P. Roth. Operating Experience with Vertical Borehole Heat Exchanger for Underground Thermal Energy Storage Applications in Chile and Argentina. Proc. of the World Geothermal Congress 2005, 24-29 April 2005, Antalya, Turkey, 1446.pdf (**международ. конгрес**).
- [14] Georgiev, A. Simulation and experimental results of a vacuum solar collector system with storage. Energy Conversion and Management, 2005, V. 46 (9-10) p. 1423-1442 (**IF: 1,244**).
- [15] Georgiev, A., A. Busso, P. Roth. Shallow Borehole Heat Exchanger: Response test and Charging - Discharging test with solar collectors. Renewable Energy, 2006, V. 31 (7) p. 971-985 (**IF: 0,85**).
- [16] Georgiev, A., R. Popov, S. Stavrev. Borehole for Implementing of Thermal Response Test in the Technical University Sofia, branch Plovdiv. Proc. of the 4th Int. Scientific Conference "Energy Efficiency and Agricultural Engineering", 1-3 October, 2009, Rousse, Bulgaria, p. 525 – 530 (**международ. конференция**).

- [17] Urchueguia, J.F., P. Atanasov, A. Georgiev. A Mobile Thermal Response Test Facility for Heat Injection and Extraction at the Polytechnic University of Valencia. J. of Fundamental Sciences and Applications, Vol. 15, 2009, Proc. of the Int. Scientific Conf. „Advanced Manufacturing Technologies”, AMTECH’09, pp. 297-303 (**международ. конференция**).
- [18] Georgiev, A., R. Popov, I. Valkov, N. Kaloferov. Utilization of the thermal energy potential in photo voltaic solar panels. Proceedings of the World Renewable Energy Congress-XI, 2010, Abu Dhabi, United Arab Emirates, 25-30 September 2010, 199.pdf (**международ. конгрес**).
- [19] Toshkov, E., A. Georgiev, R. Popov. Measuring system of a hybrid installation with ground source heat pump and solar collectors. J. of the Technical Univ. Sofia, branch Plovdiv, “Fundamental Sciences and Applications”, Vol. 20, 2014, pp. 33-38.
- [20] Bottarelli, M., M. Bortoloni, Y. Su, C. Yousif, A. A. Aydin, A. Georgiev. Numerical Analysis of a Novel Ground Heat Exchanger Coupled with Phase Change Materials. Applied Thermal Engineering, Vol. 88, 2015, pp. 369-375, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.10.016> (**IF: 3,043**).
- [21] Toshkov, E., A. Georgiev, R. Popov, N. Vassileva. Investigation methods of hybrid Ground Source Heat Pump system with solar collectors. Proc. of the Union of scientists, Ruse. 6th Int. Conference “Energy Efficiency and Agricultural Engineering”, Ruse, Bulgaria, November 11-12, 2015, ISSN 1311-9974, p. 55 – 62 (**международ. конференция**).
- [22] Georgiev, A. Installation of Ground Source Heat Pump systems in Bulgaria - yes or no? Proc. of the 15th Int. Scientific Conf. “Renewable energy & Innovative technologies”, 10 - 11 June, Smolyan, 2016, Bulgaria, Vol. 1, pp. 21-26 (**международ. конференция**).
- [23] Georgiev, A. Preconditions for cadastre preparation using ground thermal properties. Proc. of the 15th Int. Scientific Conf. “Renewable energy & Innovative technologies”, 10 - 11 June, Smolyan, 2016, Bulgaria, Vol. 1, pp. 27-32 (**международ. конференция**).
- [24] Amanzholov, Tannur, Bakytzhan Akhmetov, Aleksandar Georgiev, Aidarkhan Kaltayev, Rumen Popov, Daniela Dzhonova-Atanasova, Rustem Manatbayev, Madina Tungatarova. Installation for thermal response test implementation. Proc. of the 15th Int. Scientific Conf. “Renewable energy & Innovative technologies”, 10 - 11 June, Smolyan, 2016, Bulgaria, Vol. 1, pp. 164-168 (**международ. конференция**).
- [25] Georgiev, A.G. Long term experience and research on hybrid thermal systems. Bulgarian Chemical Communications, Vol. 48, Special Issue E, 2016, pp. 7-18 (**IF: 0,238**).

- [26] Georgiev, A.G, R. K. Popov, E. T. Toshkov, In-situ measurements of ground thermal properties around borehole heat exchangers in Plovdiv, Bulgaria. Bulgarian Chemical Communications, Vol. 48, Special Issue E, 2016, pp. 19-26 (**IF: 0,238**).
- [27] Akhmetov, B., A. G. Georgiev, A. Kaltayev A. A. Dzhomartov, R. Popov M. S. Tungatarova, Thermal energy storage systems – review. Bulgarian Chemical Communications, Vol. 48, Special Issue E, 2016, pp. 31-40 (**IF: 0,238**).
- [28] Vassileva, N. D., A. G. Georgiev, R. K. Popov, Simulation study of hybrid ground-source heat pump system with solar collectors. Bulgarian Chemical Communications, Vol. 48, Special Issue E, 2016, pp. 71-76 (**IF: 0,238**).
- [29] Lishev, S. N., R. K. Popov, A. G. Georgiev, Specialized measuring system for analysing thermal fields in hybrid systems. Bulgarian Chemical Communications, Vol. 48, Special Issue E, 2016, pp. 96-101 (**IF: 0,238**).
- [30] Amanzholov, T., B. Akhmetov, A. G. Georgiev, A. Kaltayev, R. K. Popov, D. B. Dzhonova-Atanasova, M. S. Tungatarova, Numerical modelling as a supplementary tool for Thermal Response Test. Bulgarian Chemical Communications, Vol. 48, Special Issue E, 2016, pp. 109-114 (**IF: 0,238**).
- [31] Seitov, A., B. Akhmetov, A. G. Georgiev, A. Kaltayev, R. K. Popov, D. B. Dzhonova-Atanasova, M. S. Tungatarova. Numerical simulation of thermal energy storage based on phase change materials. Bulgarian Chemical Communications, Vol. 48, Special Issue E, 2016, pp. 181-188 (**IF: 0,238**).
- [32] Dzhonova-Atansova, D. B., A. G. Georgiev, R. K. Popov, Numerical study of heat transfer in macro-encapsulated phase change material for thermal energy storage. Bulgarian Chemical Communications, Vol. 48, Special Issue E, 2016, pp. 189-194 (**IF: 0,238**).
- [33] Georgiev, A., Rumén Popov, Emil Toshkov. Investigation of a hybrid system with ground source heat pump and solar collectors: Charging of thermal storages and space heating. Renewable Energy, March 2020, V. 147, Part 2, pp. 2774-2790, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.12.087> (**IF: 6,274**).
- [34] Popov, R., Nikolay Paunkov, Vania Rangelova, Aleksandar Georgiev. Study of hybrid thermal system with photovoltaic panels using virtual instruments. Renewable Energy, Vol. 154, July 2020, Pages 1053-1064, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.03.024> (**IF: 6,274**).
- [35] Kiloglu, B., G. Karaca Dolgun, O. V. Güler, A. Keçebas, Aleksandar Georgiev. Thermodynamic performance of a heat pump based concentrating parabolic trough photovoltaic thermal system for a micro CHP. Proc. of “Alternative Energy Sources, Materials & Technologies,

AESMT'21", Vol. 3, 2021, 14 - 15 June, 2021, Ruse, Bulgaria, ISSN 2603-364X, pp. 11-12.

- [36] Incili, V., G. Karaca Dolgun, A. G. Georgiev, A. Keçebas, N. S. Çetin. Performance evaluation of a hybrid micro-CHP integrated PV-Stirling engine for local heating system. Proc. of "Alternative Energy Sources, Materials & Technologies, AESMT'21", Vol. 3, 2021, 14 - 15 June, 2021, Ruse, Bulgaria, ISSN 2603-364X, pp. 27-28.