

**ЕНЕРГИЙНА ЕФЕКТИВНОСТ НА КОМБИНИРАНОТО ПРОИЗВОДСТВО  
И ПРЕНОСА НА ТОПЛИНА В СИСТЕМИТЕ ЗА ЦЕНТРАЛИЗИРАНО  
ТОПЛОСНАБДЯВАНЕ**

Калоян Христов

**ENERGY EFFICIENCY ON COMBINED HEAT AND POWER PRODUCTION  
AND HEAT SUPPLY AT DISTRICT HEATING SYSTEM**

Kaloyan Hristov

*The electrical power of steam turbine cogeneration systems depends on the size of the heat load released, the temperature inlet water temperature district heat exchanger (boiler-condenser) and the water flow through it. This report aims to develop a mathematical model for the determination of the electrical power of backpressure steam turbine PR-66-130/10 based on a developed simulation model and multivariate calculations using the computer code - GateCycle.*

**Въведение**

Комбинираното производство на топлинна и електрическа енергия е съвременен метод за преобразуване на първичните енергийни ресурси. При него двата енергийни продукта се генерират в една енергопреобразуваща инсталация. Паротурбинните инсталации са намерили най-широко приложение при комбинираното производство на топлинна и електрическа енергия [2]. В тези инсталации постъпващата пара се използва за производство на електрическа енергия и за подгриване на мрежова вода в топлофикационни подгреватели. Подгрятата мрежова вода се транспортира до топлинните потребители чрез топлопреносната мрежа. Абонатните станции са свързващото звено между консуматорите на топлина и топлопреносната мрежа. В тях параметрите на мрежовата вода се трансформират съобразно енергийните нужди на топлинните консуматори.

Целта на настоящия доклад е да представи подход за определяне енергоефективния режим на системата за централизирано топлооснабдяване.

## Постановка на задачата

Преносът на топлинна енергия в системите за централизирано топло-снабдяване се свежда до избора на оптимална температура на мрежовата вода в подаващия тръбопровод [3, 8]. Тя влияе върху ефективността на системата по две пера: от температурата на мрежовата вода зависят топлинните загуби по преноса в топлопреносната мрежа и разходът на мрежовата вода е пряко свързан с консумираната енергия от мрежовите помпи за нейния транспорт до потребителите.

За да се оцени ефективността на системата за транспорт на топлинна енергия, трябва да се вземат предвид редица особености, които оказват влияние върху нейната икономичност:

- характеристиката на мрежовите помпи, с които мрежовата вода се транспортира в топлопреносната мрежа;
- видът на централното регулиране на топлинните товари;
- структурата на топлопреносната мрежа;
- характерът на консумацията на топлинна енергия от потребителите в системата.

Енергоефективният режим на работа при преноса на топлина в системите за топлоснабдяване се определя от минимума на следната функция [2, 3]:

$$C_{ТЗ} + C_{\text{пренос}} = \min \quad (1)$$

където:

$C_{ТЗ}$  и  $C_{\text{пренос}}$  са съответно финансови разходи свързани с топлинните загуби в ТПМ и тези, свързани с консумацията на електрическа енергия при преноса на мрежова вода в системата.

Предложената зависимост (1) отчита само финансовите разходи, свързани с консумираната електрическа енергия и загубите на топлина в системата. За да се оцени оптималният температурен график, е необходимо да се отчетат разходите, свързани с производството на топлина и електрическа енергия в източника на топлина.

Определянето на оптималния температурен график чрез финансовото изражение не е обективен инструмент. Това се дължи на динамичното изменение на пазарните цени на топлинната и електрическата енергия. Друг подход за определяне на оптималния температурен график е чрез използването на вложеното количество условно гориво за производството на електрическа енергия необходима за преноса на мрежова вода в системата и това, което е еквивалентно на топлинните загуби в системата. За целта е необходимо да се определи еквивалентът на първичен енергоносител на консумираната електрическа енергия и загубите на то-

плина [7]. Тя може да се отчете чрез топлинния еквивалент на вложения първичен енергоносител -  $Q_{не}$ :

$$Q_{не} = Q_{тз} e_p \quad (2a)$$

$$Q_{не} = N_{\text{пренос}} e_p \quad (2б)$$

където:

$Q_{тз}$  и  $N_{\text{пренос}}$  са съответно топлинните загуби и консумираната електрическа мощност при преноса на топлина в ТПМ, MW;

$e_p$  – коефициентът, отчитащ разходите, свързани с производство и пренос на дадения вид енергия (топлинна или електрическа);

Стойността на коефициента за определянето на еквивалентната мощност на първичния енергоносител ( $e_p$ ), вложен в производството, е 3,00, а за топлинните загуби този коефициент е в интервала от 1,10 до 1,25. По-ниската стойност съответства на производството на топлина от котел с гориво природен газ, а по-високата стойност е за твърди биогорива (дървени брикети). В големите системи за топлоснабдяване в нашата страна основното гориво на енергийните котли е природен газ, затова при изчисляването вложената топлинна мощност с горивото еквивалентна на топлинните загуби в ТПМ ще е при  $e_p = 1,10$ .

За по пълна картина е необходимо определянето на оптималния температурен график на преноса на топлина в ТПМ трябва да бъдат отчетени три компонента: изразходваното гориво от инсталацията за комбинирано производство -  $V_{ит}$ , условното гориво, съответстващо на топлинните загуби -  $V_{тз}$  и на консумираната електрическа мощност -  $V_{\text{пренос}}$  [1, 2]. Класическият запис на тази оптимизационна задача е следният:

$$V_{ит} + V_{тз} + V_{\text{пренос}} = \min \quad (3)$$

Минимизирането на разхода на гориво за производството на топлинна и електрическа енергия не винаги отговарят на оптималния режим [4], който инсталацията за комбинирано производство реализира.

За да се осигури реализирането на висока икономия на гориво в източника на топлина, е необходимо оптимизационната задача за определяне на оптималния температурен график да се декомпозира. Декомпозицията на задачата се свежда до два етапа:

I етап – при зададено топлинно потребление в системата за топлоснабдяване ( $Q_1$ ) да се определи температурата на мрежовата вода в подаващия топлопровод ( $\tau_1$ ), така че сумата от горивния еквивалент на топлинните загуби и консумацията на електрическа енергия за транспорт на топлоносителя да има минимална стойност;

$$V_{тз} + V_{\text{пренос}} = \min \quad (4)$$

II етап – след определяне на оптималната температура на мрежовата вода за дадено топлинно потребление, съгласно уравнение (4) се пристъпва към намиране на режима на работа на инсталацията за комбинирано производство с висока енергийна ефективност. Критерият за избор на режим с висока енергийна ефективност се определя при реализиране на максимална икономия на гориво от инсталацията ( $\Delta B = \max$ ). При намирането на този режим се определя разходът на условно гориво, който се реализира в източника на топлина.

Разглежда се система за централизирано топлоснабдяване. Общата дължина на топлопроводите в системата е 66 599 m [5]. Полагането на топлопроводите в топлопреносната мрежа е изпълнено и изпълнено по три способа: подземно канално, подземно без канално, и въздушно. Енергийната ефективност на топлоснабдителната система е оценена при отпускането на топлина от паротурбинна за комбинирано производство тип ПР-66-130/10. Тя отпуска топлинна енергия за битови потребители чрез бойлер-кондензатор. Разгледано е изменението на топлинния товар на потребители в интервала от 80 MW до 130 MW. Минималният топлинен товар съответства на началото на отоплителния сезон, а максималният - на изчислителната консумация на потребителите в топлинния район. Температурата на мрежовата вода на изхода от източника на топлина е прието да се изменя в границите от 60 до 100 °C, а постъпващата се изменя в интервала от 50 до 70 °C.

При изследването на режимите на работата на топлопреносната мрежа е използван софтуер за симулационно моделиране. Теплопреносната мрежа е моделирана със софтуерния продукт **TERMIS**, а инсталацията за комбинирано производство с **GateCycle**.

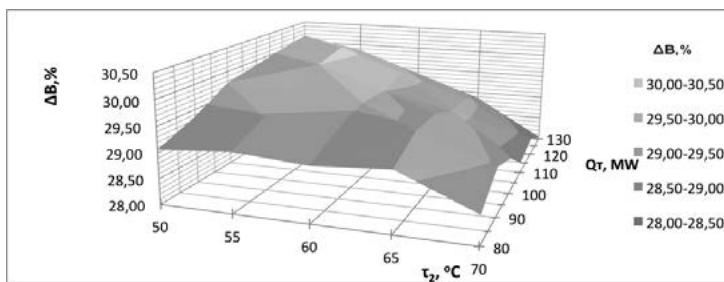
Основните паспортни технически данни за разглежданата паротурбинна инсталация ПР66-130/10 са:

- налягане на свежата пара -  $p_o = 13$  MPa;
- температура на свежата пара -  $t_o = 535$ °C
- максимален топлинен товар на бойлер-кондензатора  $Q = 130$  MW;
- максимално подгриване на мрежовата вода в бойлера  $\Delta\tau = 50$  °C;
- максимален разход на мрежова вода през бойлера  $G = 2600$  t/h;
- граници на изменение на налягането на парата в бойлера от 0,1 до 0,25 MPa;
- максималния разход на пара в бойлера-кондензатора е 230 t/h;

Енергийната ефективност на инсталацията за комбинирано производство е оценена чрез икономията на условно гориво  $\Delta B$ . Тя се полу-

чава при удовлетворяване на определено енергопотребление (топлинна или електрическа енергия) при съвместно производство, сравнено с тази енергия при разделения метод. Подробна методика за определянето на икономията на гориво е представена в [2, 6]

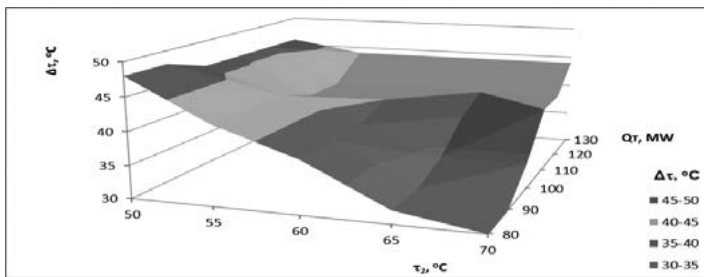
С помощта на софтуера за симулационно моделиране **GateCycle** е извършено симулационно изследване на работата на инсталацията за комбинирано производство и е оценена икономията на гориво. На фиг.1. е представена графично максималната икономия на гориво от паротурбинната инсталация при изменение на топлинния товар, отпуснат в системата за топлоснабдяване и температурата на постъпващата мрежова вода за подгръване в бойлер-кондензатора.



Фигура 1. Максимална икономия на гориво за паротурбинната инсталация при изменение на топлинния товар и температурата на постъпващата мрежова вода в бойлер-кондензатора.

От графиката се вижда, че максималната икономия на гориво от паротурбинната инсталация при изменение на топлинния товар, отпуснат в системата за топлоснабдяване и температурата на постъпващата мрежова вода за подгръване в бойлер-кондензатора, е показана на фиг.2. На представената графично максимална икономия на гориво се наблюдава, че за разгледания режим на работа на инсталацията за комбинирано производство тя се изменя в интервала от 28,55 до 30,2 %. Ниските стойности съответстват на температура на мрежовата вода 70 °C и топлинен товар 80 MW, а по-високата стойност е при максималния топлинен товар и температура на мрежовата вода 50 °C.

Изменението на температурна разлика при подгръването на мрежовата вода в бойлер-кондензатора, при която се реализира максималната икономия на гориво, е показано на фиг.2.



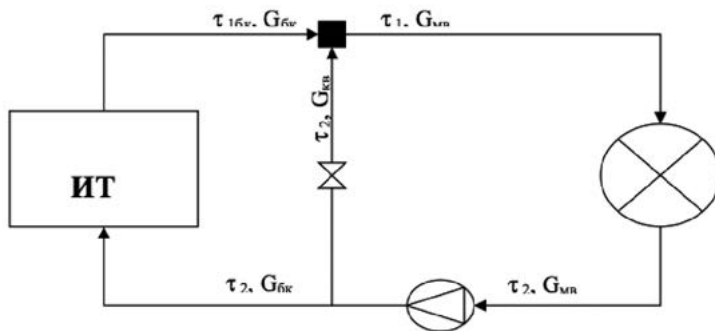
Фигура 2. Изменение на температурната разлика на мрежовата вода подгрявана в бойлер-кондензатора при реализирането на максимална икономия на гориво от паротурбинната инсталация

Когато е известна стойността на температурната разлика за дадена температура на обратната мрежова вода  $\tau_2$  и отпускания топлинен товар в системата за централизирано топлоснабдяване  $Q_T$ , може да се определи оптималната температура на водата в подаващия топлопровод -  $\tau_1$ . Тази температура на подаваната мрежова вода е оптимална от гледна точка на инсталацията за комбинирано производство. За да се определи оптималната температура на системата за топлоснабдяване, е необходимо да се изследва режимът на работа на топлопреносната мрежа.

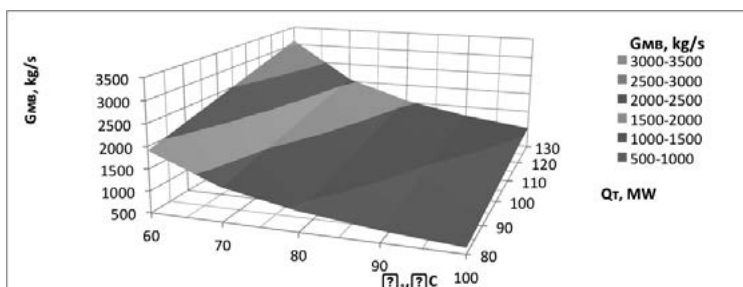
Определените величини, при симулационното изследване на топлопреносната мрежа, са:

- топлинните загуби при пренос на топлина –  $Q_{T3}$ , MW;
- консумираната електрическа мощност при транспорта на мрежовата вода в системата за топлоснабдяване –  $N_{\text{транс}}$ , MW;

На фиг. 3. е представена опростена схема на движението на потоците мрежова вода в разглеждания отоплителен район. На представената схема от обратната магистрала пристига мрежова вода ( $G_{MB}$ ) с температура  $\tau_2$ . Тя се разделя на две части. Единият поток ( $G_{BK}$ ) се подгрява в източника на топлина в бойлер-кондензатор чрез отработена пара от противоналегателна паротурбинна инсталация тип ПР-66-130/10. Другият поток ( $G_{KB}$ ) мрежова вода постъпва чрез къса връзка в смесителен колектор. В него се смесват двата потока и се формира температурата на мрежовата вода към топлоснабдителната система.

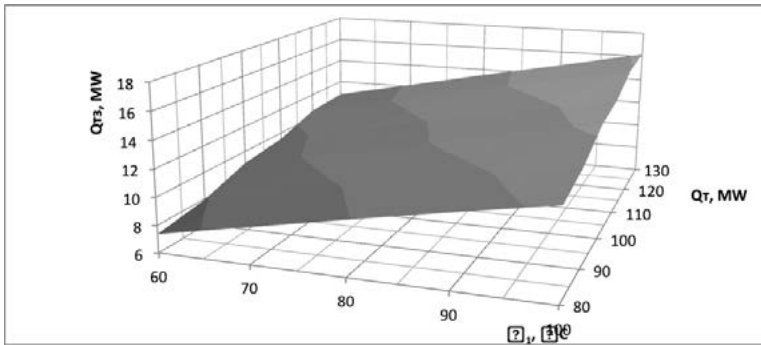


Фигура .3. Опростена схема на топлоснабдителната система  
 На фиг.4. е показано изменението на разхода на мрежова вода за разглеждания топлинен район, в зависимост от температурата на мрежовата вода в подаващата магистрала и топлинния товар.



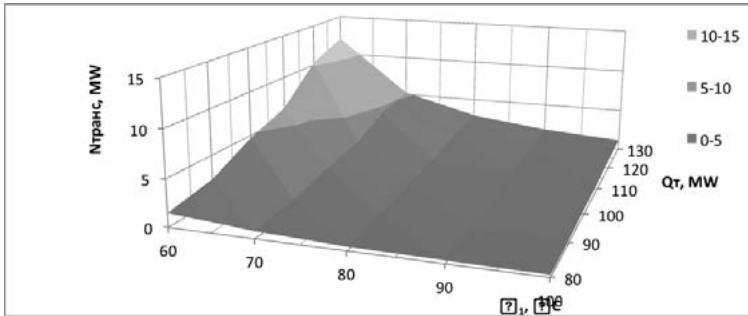
Фигура 4. Изменение на разхода на мрежова вода в зависимост от температурата в подаващата магистрала и топлинния товар

На фиг.5. и фиг.6. е представено графично изменението на топлинните загуби и консумацията на електрическа мощност при изменение на топлинния товар и температурата на мрежовата вода на изхода от източника на топлина.



Фигура 5. Загуби на топлина при преноса на топлинна енергия в системата за топлоснабдяване

Топлинните загуби на фиг.5. са определени съгласно външната температура, съответстваща на отпускания топлинен товар в системата за топлоснабдяване.



Фигура 6. Консумирана електрическа мощност за транспорт на топлоносител в системата за топлоснабдяване

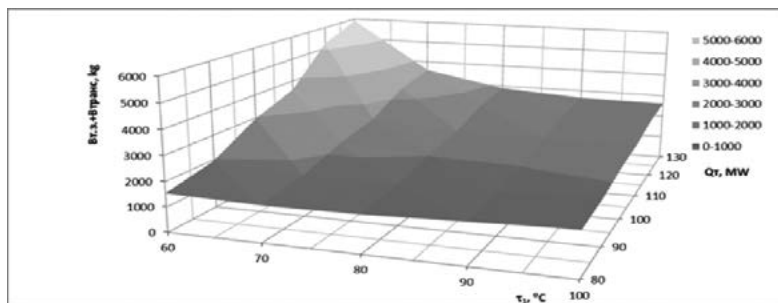
Вследствие на намаляването на топлоносителя при повишаване на температурата на мрежовата вода се намалява необходимата електрическата мощност за транспорт на мрежовата вода в системата. Повишаване на електрическата мощност за транспорта на топлина в системата се наблюдава при увеличение на топлинния товар и понижаване на температурата на мрежовата вода след източника на топлина. Тогава разходът на мрежова вода достига максимални стойности. Консумираната електрическа мощност, за разгледания случай на работа на ТПМ, се изменя в интервала 0,25 MW до 12,00 MW.

Резултати по-горе, са получените, без да се отчитат разходите за



производство на топлинна енергия в източника на топлина и не са взети предвид хигиенните изисквания за минималната температура на топлата вода за домакинствата.

На фиг.7. е представено изменение на разходите, свързани с транспорта на топлина в системата за топлопреносната мрежа, изразени в условно гориво в зависимост от топлинния товар и температурата на подаваната мрежова вода.



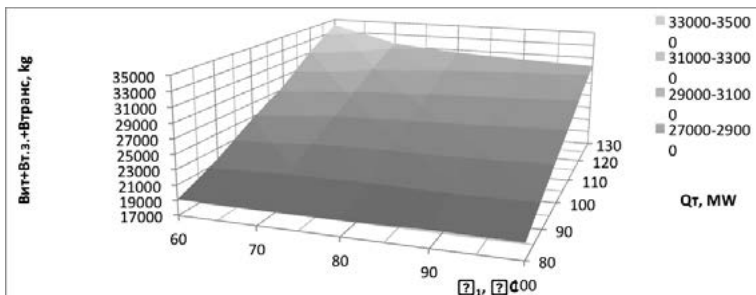
Фигура 7. Изменение на разходите, свързани с транспорта на топлина в системата за топлопреносната мрежа, изразени в условно гориво в зависимост от топлинния товар и температурата на подаваната мрежова вода.

Минималната стойност на вложеното условно гориво за транспорт на топлина в топлопреносната мрежа (фиг.7.) се наблюдава при ниски температури на мрежовата вода на изхода от централата. С увеличаване на консумираната топлинна мощност минималните стойности се изместват към по-високи температури на мрежовата вода. Температурата на мрежовата вода и топлинния товар, при които разходите, свързани с транспорта на топлинна енергия (изразени в условно гориво), имат минимална стойност, са представени в табл. 1.

таблица.1.

Qt, MW	80	90	100	110	120	130
$\tau_p, ^\circ\text{C}$	70	80	80	90	100	100
Вт.з.+Вт.транс, kg	1459,3	1663,8	2020,2	2192,1	2528,4	2620,0

Изменението на разхода на условно гориво при транспортирането на топлина в разглеждания топлинен район, с отчитане на вложеното количество първични ресурси от източника на топлина, е представено на фиг.8.



Фигура 8. Изменение на общото количество условно гориво за поддържането на зададения температурен график при транспорта на топлина в системата в зависимост от топлинния товар и температурата на подаваната мрежова вода.

Вложеното количество условно гориво в източника на топлина и неговият еквивалент на консумираната електрическа мощност и топлинните загуби при поддържането на разглеждания температурен режим на ТПМ се изменя в интервала от 19100 kg до около 34000 kg. По-ниските стойности се наблюдават при консумация на топлина от потребителите от 80 MW, а по-високите стойности се реализират при топлинен товар на консуматорите от 130 MW.

В табл. 2. са представени сумата на горивния еквивалент за транспорт на топлина в системата за топлоснабдяване и направените разходи са свързани с комбинираното производство в източника. Частта от тази сума, свързана с комбинираното производство, е получена при реализиране на максимална икономия на гориво. Горивният еквивалент на топлинните загуби и консумацията на електрическа енергия за транспорт на топлосносителя е получен съгласно формула (2а и 2б).

таблица 2.

Qt, MW	80	90	100	110	120	130
$\tau_1, ^\circ\text{C}$	70	80	80	90	100	100
Вт.з.+ Втранс+ $V_{\text{ИТ}}$ , kg	19042,1	21305,9	23822,3	25780,2	27741,4	29661,2

От фиг. 7. и фиг. 8. се вижда, че вложеното количество първични енергийни ресурси за комбинирано производство надвишават еквивалента на условно гориво за преноса на топлина за топлоснабдителната система. Това дава предпоставки за разработка на системи от мероприятия с цел подобряване енергийната ефективност на източника на топлина.

## Изводи

В настоящия доклад е оценена енергийната ефективност на системата за топлоснабдяване. Разгледана е енергийната ефективност на инсталацията за пренос на топлинна енергия в системата за топлоснабдяване и ефективността на работа на отпускането на топлина от паротурбинна инсталация ПР-66-130/10.

Формулирана е и е решена оптимизационна задача за преноса на топлинна енергия в системите за централизирано топлоснабдяване с отчитане на комбинираното производство в източника на топлина. Решаването на оптимизационната задача позволява да се определи температурата на мрежовата вода в подаващата топлинна магистрала, така че произведената електрическа енергия да се реализира с максимална икономия на гориво и разходите свързани с транспорта на топлина (изразени в условно гориво) да имат минимална стойност.

## Литература

- [1] **Геновски Ив., К. Христов**, „Ефективен режим на работа на топлоснабдителна система“, XXI-та **Научна конференция с международно участие ЕМФ 2016**, Созопол 2016
- [2] Соколов Е. Я. Теплофикация и тепловые сети. - М., Энергоиздат. 2001
- [3] Шиндарски Пл. Ц. Цанов, К. Йовков, „Оптимизация на експлоатационните разходи свързани със загубите на топлина и потребление на енергия, в зависимост от потреблението на топлинна енергия и температурата в подаващата магистрала“ ЕНЕРГИЕН ФОРУМ 2005, Варна
- [4] Яковлев Б. В., „Повышение эффективности систем теплофикации и теплоснабжения“, Москва 2008
- [5] Техническа характеристика на топлопреносна мрежа, април 2010, Теплофикация-София ЕАД
- [6] *Наредба № РД-16-267-„Определяне на количеството електрическа енергия, произведена от комбинирано производство на топлинна и електрическа енергия“ 2008.*
- [7] Наредба №7 от 2007г. за енергийна ефективност, топлосъхранение и икономия на енергията в сгради
- [8] Volkova An., Vl. Mashatin, Al. Hlebnikov, Andres Siirde, “Methodology for the Improvement of Large District Heating Networks” 2012, Perugia, Italy

**Автор:**

гл. ас. д-р инж. Калоян Христов Христов, Технически университет-София тел. 0898571366, k.hristov@tu-sofia.bg.