

# **Хибридна ЯЕЦ с реактор mPower и газово прегряване на парата**

**автор: маг. инж. Ана Борисова**

## **Увод**

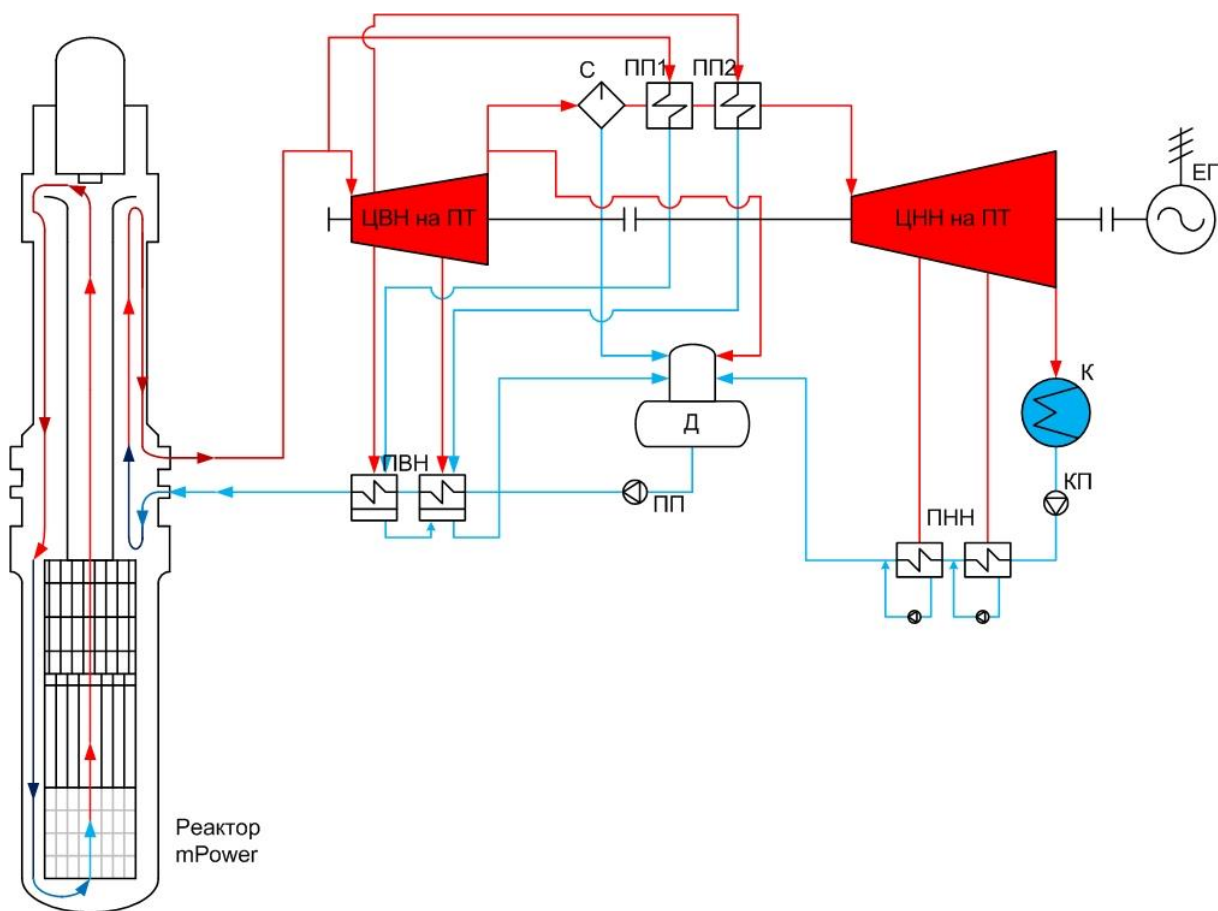
Големите единични мощности на ядрените енергийни реактори до скоро бяха смятани за логичния път на развитие на ядрената технология. Сериозните капитални вложения, дългият период на лицензиране и изграждане, както и значителното влияние върху инфраструктурата и баланса на съществуващи национални електропреносни системи с относително малък капацитет, създават идеални условия за разработка на нови проекти на реактори с малка и средна мощност. Оказва се, че за развиващите се страни, особено такива без съществуващи ядрени съоръжения, инсталирането на такъв тип реактори е много по-достъпен вариант. Настоящите проекти за малки реактори с вода под налягане обещават интегрална конфигурация на основния контур, липса на тръбопроводи с голям диаметър, редица пасивни функции за безопасност и цялостно опростяване на дизайна.

Развитието на ядрената енергетика на този етап е фокусирано основно върху безопасността. Дори и при новите проекти на водо-водни енергийни реактори, условията в неядрената паротурбинна част остават неизменни. На входа на турбината се подава суха наситена или леко прегрята пара с ниски параметри. В резултат по-голямата част от стъпалата на турбината работят с влажна пара. Това налага възприемането на конструктивни и схемни решения, насочени преди всичко към намаляване на загубите на енергия от влажност и ограничаване до минимум на ерозионното износване на лопатъчния апарат. С тази цел се разполага сложна и скъпо струваща система за сепарация и междинно прегряване на парата.

## **Принципна топлинна схема на ЯЕЦ с реактор mPower**

Реакторът mPower, разработван от фирма Babcock & Wilcox, е типичен малък водо-воден ядрен реактор с проектна електрическа мощност от 180 MW. Тъй като засега дизайнът е фокусиран основно върху самия реактор, беше синтезирана структурата на втори контур на централата и бяха проведени изчисления на материалните и топлинни баланси на всички елементи от паротурбинната инсталация. За целта бе използван специализираният за подобни цели софтуерен продукт Thermoflex на фирмата Thermoflow Inc.

По-долу на Фиг. 1 е показана принципната топлинна схема, по която бяха извършени изчисленията. Началните параметри на парата налагат междинна сепарация и прегрев. С посочения в проектните данни дебит на свежа пара от 267 kg/s, оптимално регенеративно подгръване и стандартни стойности на вътрешния относителен к.п.д. на парната турбина, нетната електрическа мощност наистина се получи 180 MW, а нетният електрически к.п.д. на централата – 33,89%.

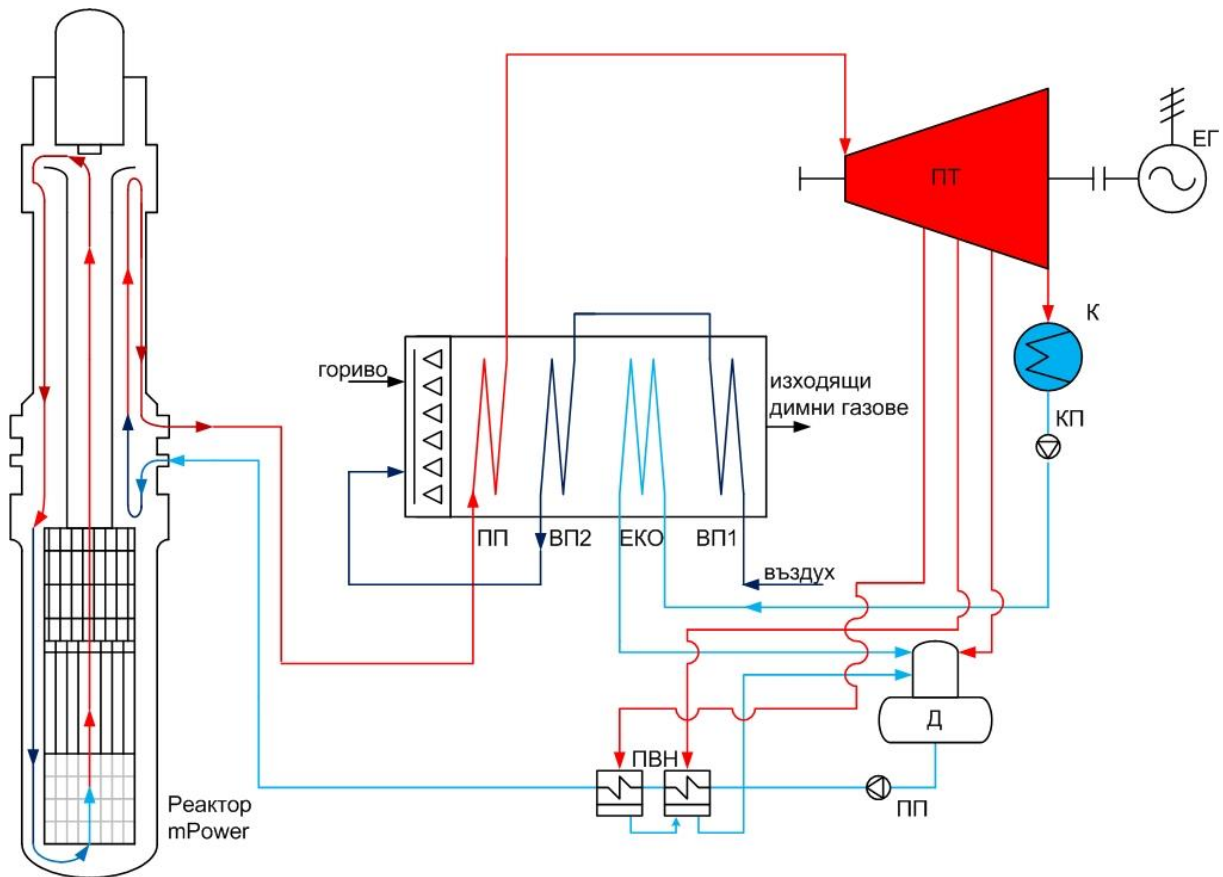


Фигура 1. Принципна топлинна схема на ЯЕЦ с реактор mPower

В предишно изследване бяха доказани ползите от газово прегряване на парата, произведена в парогенераторите на ядрено енергийен блок с реактор ВВЕР-1000. В настоящия доклад са разгледани сходни технологични решения и са показани някои от технико-икономическите параметри, получени след изчисления на материалните и топлинни баланси на синтезираните схеми на хибридни централи.

### Ядрен енергиен блок с газово прегряване на парата чрез директно изгаряне на горивото

В парогенераторите на ядрения блок се произвеждат значителни количества леко прегрята пара. Нейното допълнително прегряване може да се извърши в котелен агрегат със специфична конструкция. Освен паропрегреватели е нужно да се разположат и допълнителни нагревни повърхности, с помощта на които да се намали температурата на димните газове преди изхвърлянето им през комина. В котелната техника за тази цел обичайно се използват въздухоподгреватели и економайзери. Аналогичен подход е приложен и в настоящото изследване. Принципната топлинна схема на хибридният енергиен блок е показана на Фиг. 2.



Фигура 2. Принципна топлинна схема на ЯЕЦ с реактор mPower с газово прегряване на парата чрез директно изгаряне на горивото

Основната идея при структурирането на хибридни енергиен блок бе да се запази без изменения като конфигурация и параметри ядрената паропроизводителна инсталация. В разглеждания случай това се отнася за първия контур на ядрен блок с реактор mPower и съответния парогенератор. Всички останали елементи посочени на схемата са нови и е необходимо с помощта на подходящи пресмятания да бъдат определени техните проектни параметри. В структурата на котелния агрегат са включени следните основни елементи:

- ПП – паропрегревател. В него постъпва и се прегрява парата, идваща от парогенератора на ядрения блок. Параметрите на постъпващата пара като дебит, налягане и температура се приемат равни на проектите параметри на произведената от парогенератора на блок с реактор mPower леко прегрята пара. Прието е на изхода от този елемент температурата на прегрята пара да бъде  $620^{\circ}\text{C}$ . Подобни високи стойности се прилагат успешно в най-модерните ТЕЦ със свръх-надкритични параметри на парата;
- ВП2 – въздухоподгревател второ стъпало, в него се подгрива въздухът, идващ от въздухоподгревател първо стъпало и се насочва към горивните устройства;
- ЕКО – економайзерна нагревна повърхност, в нея се подгрива основният кондензат след кондензатора;
- ВП1 – въздухоподгревател първо стъпало, в него се подгрива въздух с атмосферна температура.

Паротурбинната инсталация и нейните елементи също са нови и е необходимо с помощта на подходящи пресмятания да бъдат определени техните проектни параметри. Не се предвижда междинно прегряване на парата. Предварителното построяване на процеса на разширение на парата в „h-S” диаграма показва, че относително ниското начално налягане и високата температура на свежата пара изместват процеса на разширение на парата в турбината надясно и нагоре в диаграмата, при което паросъдържанието на влажната пара в последните стъпала на турбината е достатъчно високо и не е нужно междинното ѝ прегряване.

С така синтезираната структура на хибридният блок бяха проведени изчисления за пресмятане на материалните и топлинни баланси на всички елементи от котелната и паротурбинната инсталация. За целта бе използван специализираният за подобни цели софтуерен продукт Thermoflex на фирмата Thermoflow Inc. В табл.1 са показани получените резултати за основните технико-икономически показатели на хибридният блок. За сравнение са показани и аналогичните параметри за предварително моделираната схема на централа с реактор mPower.

Таблица 1. Основни параметри на типов ядрено-енергиен блок с реактор mPower и на хибриден блок с газово прегряване на парата чрез директно изгаряне на горивото

Параметри	Ядрено-енергиен блок	Хибриден блок
Електрическа мощност - бруто, MW	188.6	331.5
Дебит на свежа пара, kg/s	267	267
Налягане на свежата пара, bar	57	56
Температура на свежата пара, °C	300	620
Налягане в кондензатора, bar	0.07	0.07
Електрическа мощност - нето, MW	180	319
Вложена топлина в ядрената част, MW	530	530
Вложена топлина в котелния агрегат, MW	0	346.5
Нетен електрически к.п.д. %	33.89	36.36

При така зададената конфигурация на парния котел температурата на изходящите газове е 90°C, с което се осигурява нужната топлинна икономичност на съоръжението. От изложеното в таблицата става ясно, че в резултат на прегряването на свежата пара се произвежда допълнителна мощност в размер на:

$$N_{\text{ел}}^{\text{ПР}} = N_{\text{ел}}^{\text{ХБл}} - N_{\text{ел}}^{\text{ЯБл}} = 319 - 180 = 139 \text{ MW}$$

където:

- $N_{\text{ел}}^{\text{ПР}}$  е нетната електрическа мощност произведена в резултат на прегряването;
- $N_{\text{ел}}^{\text{ХБл}}$  е нетната електрическа мощност произведена от хибридният блок;
- $N_{\text{ел}}^{\text{ЯБл}}$  е нетната електрическа мощност произведена от ядрения блок.

Коефициентът на полезно действие на произведената вследствие на прегряването електрическа мощност може да се определи с израза:

$$\eta_{\text{ел}}^{\text{ПР}} = N_{\text{ел}}^{\text{ПР}} / Q_{\text{ПР}} = (139/346.5) \times 100 = 40.11\%,$$

където  $Q_{\text{ПР}}$  е вложена топлина в котелния агрегат.

Природният газ е все още едно доста скъпо гориво и в този смисъл полученото к.п.д. на преобразуване на неговата топлинна енергия в електрическа е неудовлетворително, още повече че к.п.д. на съвременните парогазови централи надвишава 58%.

### **Ядрен енергиен блок с газово прегряване на парата чрез използване на отпадната топлина от газотурбинен цикъл**

Както е добре известно, газотурбинните агрегати намират все по-широко приложение в съвременната топлоенергетика. Много голям резерв в развитието и усъвършенстването на газотурбинните ТЕЦ се крие в по-пълното използване на топлината на изходящите газове след газовата турбина, температурата на които при най-новите конструкции надминава 620°C. С оглед на това, производството на пара чрез пропускането на тези газове през специално устроени котли-утилизатори е една обичайна практика в парогазовите ТЕЦ. В настоящото изследване се анализира възможността да се използва топлината на димните газове от газова турбина, за да се осъществи прегрев на парата, произведена от ядрен енергиен блок.

Нейното прегряване може да се извърши в котел-утилизатор със специфична конструкция. Освен паропрегреватели е нужно да се разположат и допълнителни нагревни повърхности, с помощта на които да се намали достатъчно температурата на димните газове преди изхвърлянето им през комина. При котлите-утилизатори това обикновено са економайзерни нагревни повърхности. Аналогичен подход е приложен и в настоящото изследване.

В газовия поток след газовата турбина се съдържат 12 до 15 обемни % кислород. С оглед на това в някои случаи се прибягва до допълнително изгаряне на гориво чрез използване на турбинните газове като окислител. За тази цел в газовия поток се разполага специална горелка, чрез която в него се подава само гориво. По този начин може да се повиши дебитът или температурата на произвежданата пара. В настоящото изследване са използвани последователно и двете възможности:

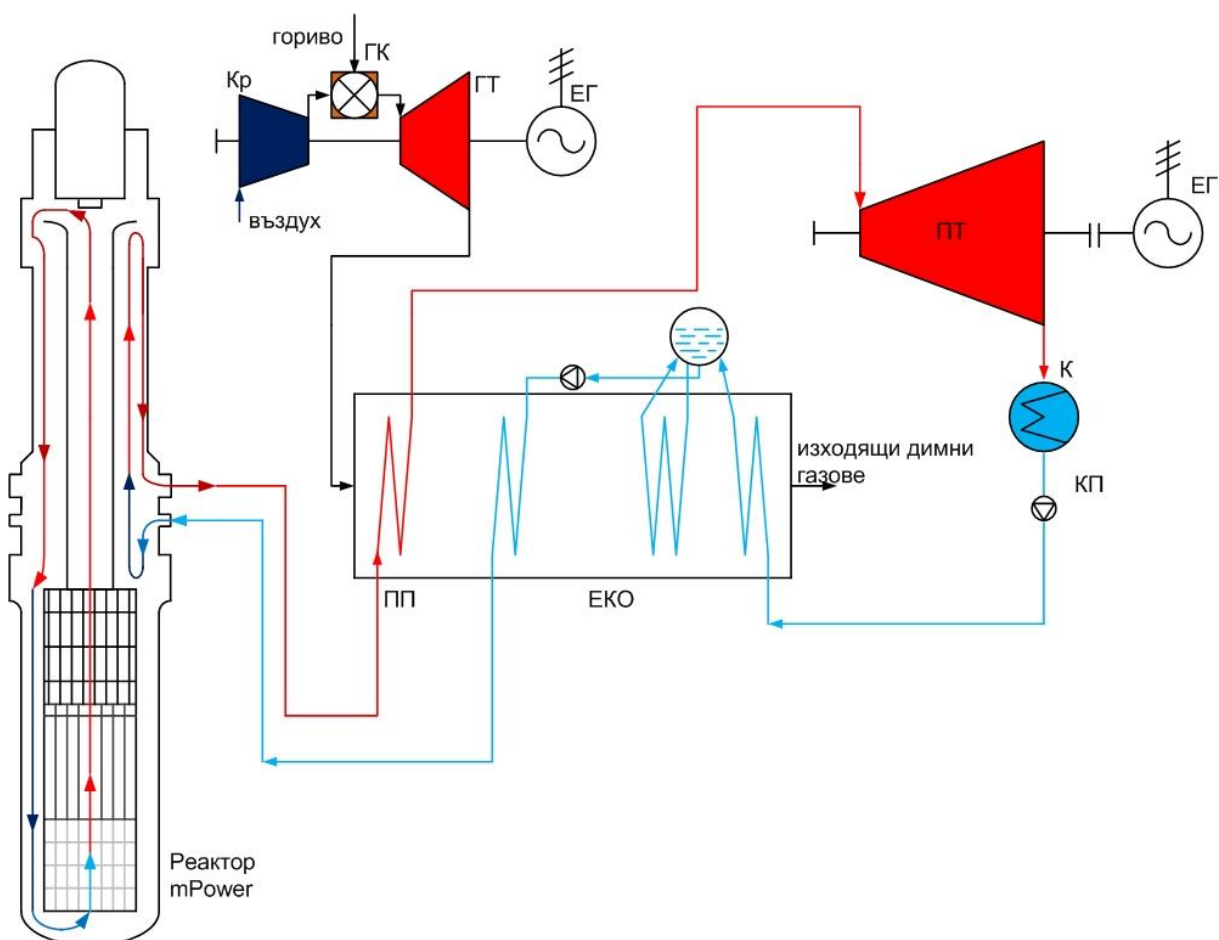
- газово прегряване на парата чрез използване на отпадната топлина от газотурбинен цикъл;

- газово прегряване на парата чрез използване на отпадната топлина от газотурбинен цикъл с допълнително изгаряне на гориво.

В структурата на котел-утилизатора са включени следните основни елементи:

- ПП – паропрегревател, в него постъпва и се прегрява парата идваща от парогенераторите на ядрения блок;
- ЕКО – економайзерна нагревна повърхност, в нея се подгръва основният кондензат, идващ от парната турбина.

На Фиг. 3 е показана принципната топлинна схема на ядрен енергиен блок с газово прегряване на парата при използване на отпадна топлина от газотурбинен цикъл.



Фигура 3. Принципна топлинна схема на ЯЕЦ с реактор mPower с газово прегряване на парата при използване на отпадна топлина от газотурбинен цикъл

Беше подбрана газова турбина GE 9371 FB, заради подходящата ѝ мощност и висока температура на изходящите димни газове – 640°C.

В табл.2 са показани получените резултати за основните технико-икономически показатели на хибридният блок. За сравнение са показани и

аналогичните параметри за предварително моделираната схема на централа с реактор mPower.

Таблица 2. Основни параметри на ядрено-енергиен блок с реактор mPower и на хибриден блок с газово прегряване на парата чрез използване на отпадна топлина от газотурбинна инсталация

Параметри	Ядрено-енергиен блок	Хибриден блок
Електрическа мощност на паротурбинния агрегат - бруто, MW	188.6	643
Електрическа мощност на газотурбинните агрегати - бруто, MW	0	287
Дебит на свежа пара, kg/s	267	267
Налягане на свежата пара, bar	57	56
Температура на свежата пара, °C	300	620
Налягане в кондензатора, bar	0.07	0.07
Електрическа мощност - нето, MW	180	627.7
Вложена топлина в ядрената част, MW	530	530
Вложена топлина в газотурбинната част, MW	0	754.4
Нетен електрически к.п.д. %	33.89	48.83

При така зададената конфигурация на котел-утилизатора, температурата на изходящите газове е около 80°C, с което се осигурява нужната топлинна икономичност на съоръжението. От изложеното в табл. 2 става ясно, че в хибридният блок се произвежда допълнителна електрическа мощност в размер на:

$$N_{\text{ел}}^{\text{ПР}} = N_{\text{ел}}^{\text{ХБл}} - N_{\text{ел}}^{\text{ЯБл}} = 627.7 - 180 = 447.7 \text{ MW}$$

Коефициентът на полезно действие на произведената във връзка с прегряването електрическа мощност може да се определи с израза:

$$\eta_{\text{ел}}^{\text{ПР}} = N_{\text{ел}}^{\text{ПР}} / Q_{\text{ГТ}} = (447.7 / 754.4) \times 100 = 59.38 \%$$

Очевидно хибридният блок с газово прегряване на парата чрез използване на отпадна топлина от газотурбинен цикъл ще има топлинна икономичност, равняваща се на икономичността на съвременните парогазови централи. Но целта всъщност е подобряване на технико-икономическите показатели без драстично увеличаване на произвежданата електрическа енергия.

В опит да се избегне горепосоченият проблем, бе анализиран и вариантът с газово прегряване на парата чрез използване на отпадната





Електрическа мощност - нето, MW	180	428.4
Вложена топлина в ядрената част, MW	530	530
Вложена топлина в газотурбинната част, MW	0	338.1
Вложена топлина при допълнителното изгаряне, MW	0	121.5
Нетен електрически к.п.д. %	33.89	43.2

При така зададената конфигурация на котел-утилизатора температурата на изходящите газове е 96<sup>0</sup>C, с което се осигурява нужната топлинна икономичност на съоръжението. От изложеното в табл. 3 става ясно, че в хибридният блок се произвежда допълнителна електрическа мощност в размер на:

$$N_{\text{ел}}^{\text{ПР}} = N_{\text{ел}}^{\text{ХБл}} - N_{\text{ел}}^{\text{ЯБл}} = 428.4 - 180 = 248.4 \text{ MW}$$

Коефициентът на полезно действие на произведената във връзка с прегряването електрическа мощност може да се определи с израза:

$$\eta_{\text{ел}}^{\text{ПР}} = N_{\text{ел}}^{\text{ПР}} / (Q_{\text{ГТ}} + Q_{\text{ДИ}}) = (248.4 / (338.1 + 121.5)) \times 100 = 54\%,$$

където  $Q_{\text{ДИ}}$  е вложена топлина при допълнителното изгаряне.

### Изводи

Проведеният изчислителен анализ и синтез на хибридна ЯЕЦ с газов прегрев на парата дава основание да се направят следните изводи:

1. Прегряването на свежата пара дава възможност съществено да се подобрят технико-икономическите показатели на енергопроизводството;

2. Най-добра топлинна икономичност може да се постигне чрез хибридизация на ядрената паропроизводителна инсталация с газотурбинни агрегати.

3. Предложената в настоящия доклад хибридизация с газотурбинни агрегати и допълнително изгаряне на гориво има нужните предпоставки да осигури оптималните технико-икономически показатели на хибридният блок, тъй като предполага достигането на високо к.п.д. при намалени инвестиционни разходи и приемливо увеличение на номиналната мощност.