

ПЪРВА СЕКЦИЯ

ТОПЛО И ЯДРЕНА ЕНЕРГЕТИКА

ЕНЕРГИЕН ФОРУМ 2024

ТЕНДЕНЦИИ В РАЗВИТИЕТО НА ПАРОТУРБИННИТЕ АГРЕГАТИ ЗА ЯЕЦ

Димитър Попов

TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF NUCLEAT STEAM TURBINES

Dimityr Popov

Abstract: In the development and construction of nuclear power plants, the center of attention is almost exclusively and always the technology of the reactor plant and its nuclear safety. In any case, however, every single nuclear technology aims at the production of thermal energy. The efficient, cheap and reliable conversion of this thermal energy into electricity by means of steam turbines always remains in the background.

The purpose of the present study is to briefly review the development of steam turbine units for nuclear power plants in recent years. For this purpose, the existing constructive solutions for nuclear power units with water reactors with an electrical capacity of over 1,000 MW are presented - both established ones and more innovative ones.

The latest achievements in the design and manufacture of high-height last stage blades, which is one of the most complex tasks in steam turbine manufacturing, are presented. The possibility of improving the construction, resp. to increase the internal relative efficiency of the turbine carried out with a more specific arrangement of the stages in its cylinders.

ВЪВЕДЕНИЕ

Икономическото развитие и благоденствие на съвременните общества се основават на достъпа до евтино и надеждно електроснабдяване. Електроенергията произведена в термичните и ядрените централи задоволява понастоящем над две трети от консумацията на електроенергия в повечето развити страни. Термичните централи изгарят органични горива. В резултат, при тяхната работа, се отделят значителни емисии на вредности и най-вече на предизвикващия климатичните промени парников газ – въглероден диоксид. Международната енергийна агенция, обобщавайки труда на множество изтъкнати експерти е изготвила сценарий за развитие на световните електрогенериращи мощности, изпълнението на който би довел до ръст на глобалната температура с не повече от 2°С (така наречения 2DS сценарий).

За ядрените централи, които са смятани за нисковъглероден производител на ел. енергия, съгласно този сценарий е предвиден сериозен ръст. Електропроизводството от ЯЕЦ трябва да се увеличи повече от два пъти достигайки през 2050 г. 17 % дял от общото производство в световен мащаб при 11 % през 2017 г. Това би изисквало всяка година да се въвеждат в експлоатация 10 000 MW нови ядрени мощности – мощност равностойна на пет ЯЕЦ като АЕЦ „Козлодуй“. Очевидно приносът на ядрената енергетика за устойчивото развитие на съвременното общество има и ще има голямо значение.

При развитието и изграждането на ядрените централи, в центъра на вниманието почти изключително и винаги е технологията на реакторната инсталация и нейната ядрена безопасност. Така или иначе обаче всяка една ядрена технология цели производството на топлоенергия. Ефективното, евтино и надеждно преобразуване на тази топлоенергия в електроенергия посредством парните турбини винаги остава на заден план.

Целта на настоящия проучване е да направи кратък преглед на развитието на паротурбинните агрегати за ЯЕЦ в последните години. Ще бъдат представени съществуващите конструктивни решения за ядрени енергийни блокове с водоводни реактори с електрическа мощност над 1 000 MW - както утвърдени такива, така и по-иновативни. В тези случаи предпочитани са бавноходните турбини, респ. турбини с номинална честота на

въртене на ротора 1 500 об/мин, поради множеството им технико-икономически предимства пред турбините с номинална честота на въртене 3 000 об/мин [1].

ТЕОРЕТИЧНИ ПРЕДПОСТАВКИ

Ядрените и термичните електроцентрали имат обща теоретична основа. В тях се извършва преобразуване на топлинна енергия в механична работа посредством термодинамичния цикъл на Ренкин. В него парната турбината играе ролята на топлинен двигател. Основните показатели описващи топлинната икономичност на ЯЕЦ са специфичния разход на топлина и коефициента на полезно действие (к.п.д.). Всички ядрени централи имат блочна структура и са изградени най-често от няколко еднакви енергийни блока. Брутният к.п.д. на енергиен блок в двуконтурната ЯЕЦ може да бъде определен със следната разгърната формула [2]:

$$\eta_{\text{бл}}^{\text{брутно}} = \eta_p \cdot \eta_{\text{тп}}^I \cdot \eta_{\text{нз}} \cdot \eta_{\text{тп}}^{II} \cdot \eta_t \cdot \eta_{oi} \cdot \eta_m \cdot \eta_g \quad (1)$$

Тук η_p , $\eta_{\text{нз}}$, $\eta_{\text{тп}}^I$ и $\eta_{\text{тп}}^{II}$ к.п.д. на реактора, парогенераторите и тръбопроводите в първи и втори контур. Те отчитат енергийни загуби вследствие на излъчване на топлина от съответните съоръжения. Обичайните им стойности са в интервала 0.985 до 0.995.

η_t е термичния к.п.д. на цикъла на Ренкин, със стойности от порядъка на 0.45 до 0.55;

η_{oi} е вътрешния относителен к.п.д. на турбината със стойности в интервала на 0.8 до 0.85;

η_m и η_g са механичен и генераторен к.п.д. със стойности от порядъка на 0.985 до 0.99;

С най-голяма тежест (респ. най-много различаващи се от единица) са факторите термичен к.п.д. η_t и вътрешен относителен к.п.д. на парната турбина η_{oi} . Мерките които могат да се предприемат за

повишаване на термичния к.п.д. при проектиране на блока са следните:

- Приемане на по-високо налягане на парата пред турбината;
- Обезпечаване на по-ниско налягане на парата след турбината, респ. по-ниска температура на охлаждащата вода за кондензатора;
- Увеличаване на степента на регенерация, чрез разполагането на по-голям брой регенеративни подгреватели и приемане на по-висока температура на подхранващата вода;

Приемане на по-високо налягане на свежата пара пред турбината води до нарастване на разполагаемия топлинен пад, но предполага възприемане на неблагоприятни от гледна точка на ядрената безопасност съпътстващи конструктивни решение, като:

- Повишаване на налягането в първия, респ. в реакторния контур, което може да създава условия за аварии с изтичане на топлоносител;
- Намаляване на запаса по достигане на точката на кипене в активната зона на реактора, което от своя страна създава условия за прегряване на топлоотделящите елементи и тяхното разгерметизиране;

Освен това възприемането на по-високи налягания в първи и втори контур означава използването на по-дебелостенни корпуси, тръбопроводи и арматура, което може да доведе до съществено повишаване на инвестиционните разходи за изграждане на централата. Така посочените обстоятелства ограничават нарастването на налягането на парата произвеждана в парогенераторите на двуконтурните ЯЕЦ до 78 Bar [3]. Но дори в някои от ново-изгражданите централи могат да се наблюдават консервативно приети ниски стойности, примерно 57.4 Bar.

Работата с ниско налягане на парата след турбината, зависи от два фактора:

- Избора на площадката за разполага на централата;

- Осигуряване на възможност за работа на последните турбинни стъпала с ниско налягане в кондензатора, респ. след турбината;

При почти всички ново-изгражданите централи се наблюдава стремеж те да се разполагат до голям естествен водоизточник, примерно каквито са случаите с големите ЯЕЦ с по четири енергийни блока в Турция и Египет, които ще използват морска вода за охлаждане на кондензаторите. Температурата на охлаждащата вода, взимана от голям естествен водоизточник, е целогодишно с 10 до 12°C, по-ниска от тази, осигурявана с охладителни кули.

Работата с ниско налягане след турбината има отношение към конструкцията на нейните последните стъпала. За повишаване на вътрешния относителен к.п.д. на парната турбина е необходимо да се усъвършенства лопатъчния апарат с цел минимални загуби на енергия. Тези и други проблеми на проточната част на парните турбини в ЯЕЦ са разгледани по-нататък.

КОНСТРУКТИВНИ ОСОБЕНОСТИ НА ПРОТОЧНАТА ЧАСТ

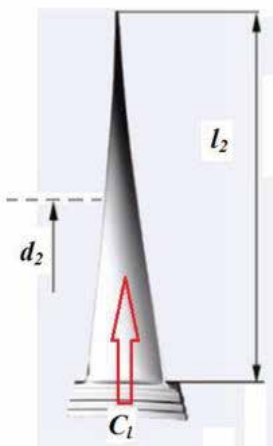
Конструирането, изграждането и използването на енергийни блокове с голяма мощност, винаги е било предпоставка за производството на евтина електроенергия в ЯЕЦ. При равни други условия енергийните съоръжения с по-голяма единична мощност изискват относително по-малки инвестиции. Това е така защото размерите и масата на съоръженията (респ. тяхната цена) не се увеличават пропорционално с увеличаването на мощността. За турбините предназначени за ЯЕЦ от съществено значение е възможността те да бъдат конструирани с колкото се може по-голяма мощност. В резултат, понастоящем най-мощните парни турбини са разположени в ЯЕЦ. Няколко от тях имат единична мощност надминаваща 1700 MW [4].

За да се изработи турбина за ЯЕЦ с голяма мощност, която да работи надеждно и икономично, е нужно да се преодолеят множество конструктивни проблеми. Основния от тях се състои в следното. Тъй като както бе посочено по-горе, че топлинния пад е малък, за да се произвежда достатъчно голяма мощност е нужно

да се увеличи масовия дебит на парата G_0 (от от равенството 2 определящо вътрешната мощност на турбината):

$$N_i = G_0 \cdot H_o \cdot \eta_{oi} \quad (2)$$

От друга страна поради ниските параметри на парата нейния специфичен обем е голям. В резултат, обемните дебити на пара $G.v$ в турбините в ЯЕЦ са с 60-90% по-големи от обемните разходи в турбините в ТЕЦ (v е специфичния обем на парата в m^3/kg). Най-голям е обемния дебит преминаващ през последното турбинно стъпало. Ефективното преработване на този голям дебит е възможно при достатъчно големи размери (височини) на дюзовите и работните лопатки на стъпалото [5]. При недостатъчни височини нарастват загубите на енергия с изходяща скорост, с което драстично намалява вътрешния относителен к.п.д. на парната турбина η_{oi} .



Фиг. 1. Параметри имащи отношение към якостното оразмеряване на работни лопатки: C_l – центробежна сила; d_2 – среден диаметър; l_2 – височина;

Конструирането и изработването на работни лопатки с голяма височина е една от най-сложните задачи в паротурбостроенето. Голямата височина предполага и голяма маса, фиг.1. Голямата маса предизвиква появата на големи механични напрежения поради действието на центробежната сила C_f . В резултат може да се стигне до разрушаване на работните лопатки. Изработването на работни лопатки с голяма височина за последното стъпало на турбината бележи съществен прогрес в последните 10–15 години, фиг. 2:

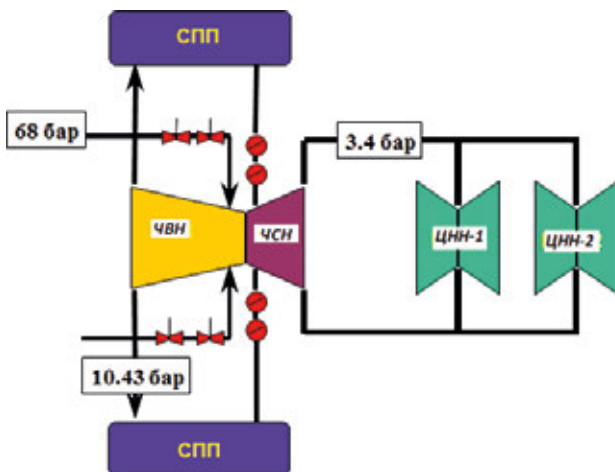


Фиг. 2. Етапи в създаването на работни лопатки с голяма височина от един от основните производители на парни турбини за ЯЕЦ [6].

Изработването на парни турбини с пределно голяма височина на работните лопатки на последното турбинно стъпало, примерно с 69 или 75 инча дава възможност да извърши цялостна оптимизация на конструкцията на турбината, водеща до два основни положителни ефекта:

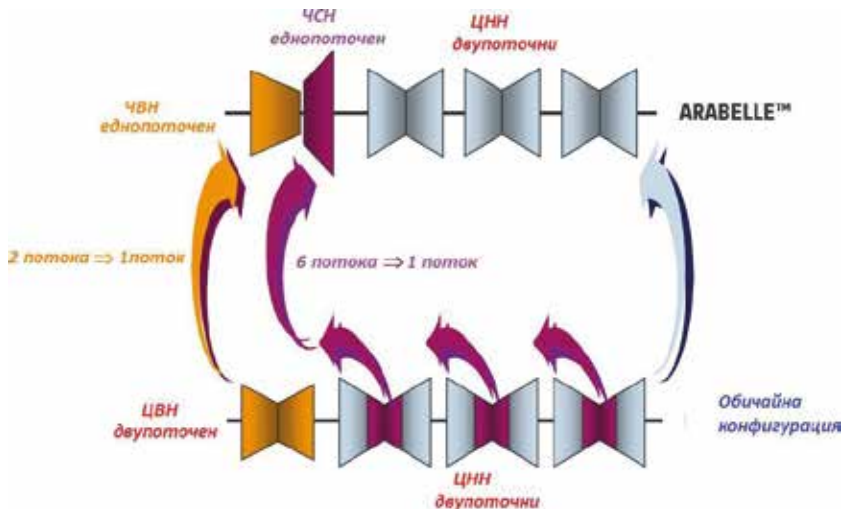
- Турбината може да се изработи с намален брой изходящи сечения, респ. с намален брой цилиндри ниско налягане;
- При проектиране на паротурбинната инсталация, може да се приеме максимално ниско проектно налягане на парата на изхода от турбината, с което да се използва наличния потенциал на площадката на централата за доставяне на охлаждаща вода за кондензаторите.

По-долу на фиг. 3 е конструкцията на турбина с мощност 1200 MW на един от основните производители на парни турбини за ЯЕЦ. Използването на работни лопатки на последното стъпало с височина 69 инча (1752.6 mm) дава възможност турбината да се конструира с два ЦНН вместо три както в конструкциите с височина 57 инча (1448.8 mm). С това се постига съществено намаляване на дължината на турбина, респ. и на машинната зала в която тя ще се разположи. Използването на работни лопатки на последното стъпало с височина 75 инча (1905 mm) дава възможност турбината да се конструира и да работи ефективно с много ниски температури на охлаждаща вода достигащи 2 – 3 °C с два ЦНН за турбини с мощност 1200 MW и с три ЦНН с мощност 1720 MW.



Фиг. 3 Турбина с мощност 1200 MW с оптимизирана конструкция [6]

Друга възможност за подобряване на конструкцията, респ. за повишаване на вътрешния относителен к.п.д. на турбина η_{oi} е осъществена с по-специфично разполагане на стъпалата на турбината в нейните цилиндри. Обичайната конфигурация прилагана от повечето турбо-строителни заводи се състои от един двупоточен цилиндър високо налягане (ЦВН) и два или три ЦНН, фиг. 4.



Фиг. 4 Преход от конструкция с двупоточен ЦВН към ЦВН съдържащ групи стъпала високо (ЧВН) и средно налягане (част средно налягане ЧСН) [7]

В двупоточния ЦВН стъпалата имат относително малка височина на дюзовите и работните лопатки. При конструкцията на ЦВН съдържащ групи стъпала високо (ЧВН) и средно налягане (част средно налягане ЧСН) става възможно да се премине преминаване от многопоточност към еднопоточност за по-голямата част от стъпалата на турбината. С това се повишава значително височина на дюзовите и работните лопатки на една голяма част от стъпалата на турбината. Това от своя страна води до съществено повишаване на вътрешния относителен к.п.д. на турбина, примерно от 33 до 36%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В последните години се наблюдава усъвършенстване на конструкциите на парните турбини с голяма мощност за ЯЕЦ. Основния подход за тази цел е изработването турбинни стъпала с пределно голяма височина на последния ред работни лопатки достигаща до 74 – 75 инча (1905 mm). При подбора на конкретната конструкция за съответния ядрен проект е необходимо да се проведе и щателна оптимизация на ниско-потенциалната част на паротурбинната инсталация с оглед подбиране на подходяща проектна температура на охлаждащата вода, с което може да се постигне съществено подобряване на технико-икономическите показатели на ядрения енергиен блок.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Цыганкова, С.Д., В.В. Кравченко (2018) Сравнительный анализ турбогенераторов с турбинами К-1200-6,8/50 и Arabelle для АЭС-2006 с реактором типа ВВЭР-1200, Наука, техника и образование 11 (52);
- [2] Попов Д., Ядрени електрически централи, Авангард Прима, 2022 г. София, ISBN - 978-619-239-021-1;
- [3] Laskowski R., Smyk A., Jurkowski R., Ance J., Wołowicz M., Uzunow N.: Selected aspects of the choice of live steam pressure in PWR nuclear power plant. Archives of thermodynamics Vol. 43(2022), No. 3, 85–109 DOI: 10.24425/ather.2022.143173
- [4] Mandement O. Latest updates on Nuclear Steam Turbines, GE Steam Power, Bulatom Nuclear Conference, Varna, Bulgaria, 7-9 June 2023;
- [5] Попов Д., Парни и газови турбини. Ифодизайн, София, 2010 г.
- [6] Бризен О., А.М. Цветков, И.В. Бронников, А.Н. Трошин, А.В. Бляшко, АТОМЕКС, Москва, 13 декември 2012 г.
- [7] Цветков А.М. Турбоустановка 1200 МВт ООО «АЛЬСТОМ Атомэнергомаш» для АЭС России, 2008

АВТОР:

проф. д-р инж. Димитър Попов, Технически университет – София,
E-mail: dpopov@tu-sofia.bg