

ЕНЕРГИЕН ФОРУМ 2019

ВЪЗМОЖНОСТИ ЗА СЪОРЪЖАВАНЕ НА ВТОРИ КОНТУР НА ЯДРЕНИ ЕНЕРГИЙНИ БЛОКОВЕ С РЕАКТОР ВВЕР-1200

Евдокия Йорданова, Ивайло Найденов

SECONDARY CIRCUIT EQUIPMENT OPTIONS FOR VVER-1200 NUCLEAR POWER UNIT

Evdokiya Yordanova, Ivaylo Naydenov

Nowadays nuclear power's development relies on constructing Generation III power reactors. One of the main commercially operated Gen III representatives is the Russian PWR design VVER-1200. A major difference, compared to earlier VVER designs, is the possibility of configuring VVER-1200 units with either 25 Hz (Arabelle™) or 50 Hz (K-1200-6.8/50) steam turbines. The current paper briefly outlines the features of both turbines and their respective heat diagrams, and makes a comparison between the two options.

Общи сведения за ВВЕР-1200

Разработката на модернизиран проект на реактор от типа ВВЕР започва в средата на 2000 г. Основната цел е да се намалят разходите по изграждането и повишаване на нивото на ядрена безопасност без предприемане на съществена промяна в основната конфигурация на ядрената паропроизводителна инсталация. В резултат, топлинната мощност е увеличена до 3200 MW и са въведени допълнителни пасивни системи за гарантиране на безопасността при проектни и надпроектни аварии.

Основните принципи, залегнали в основата на проекта на ВВЕР-1200, са:

- максимално използване на доказани технологии;
- минимални разходи и време на строителство;
- балансирана комбинация от активни и пасивни системи за безопасност, които да се справят не само с проектни, но и с извънпроектни аварии;
- намаляване на влиянието на човешкия фактор върху общата безопасност.

Налични са две основни модификации на реактор от типа ВВЕР-1200 – В-392М и В-491. Въпреки че основните параметри на двата модела са сходни, между тях има и някои съществени различия като:

- включване на пасивна система за топлоотвеждане от херметичната обвивка и пасивна система за топлоотвеждане през парогенераторите (В-491);
- включване на пасивна система за заливане на активната зона (В-392М);
- включване на активни системи за аварийен впръск високо налягане и за аварийен впръск ниско налягане (В-491);
- разлика в системите, предназначени за управление на надпроектни аварии;
- разлика в предвидената честота на повреждане на активната зона.

Моделът В-392М е проектиран от „Атоменергопроект“, Москва, а моделът В-491 – от „Атоменергопроект“, Санкт Петербург [1,2].

Характерното за енергийните блокове, съоръжени с реактори от типа ВВЕР-1200, е, че те имат възможност за работа както с турбини, въртящи се с 3000 min^{-1} , така и с т.нар. бавноходни турбини, които имат намалена честота на въртене от 1500 min^{-1} . Понастоящем енергийните блокове, използващи реактори ВВЕР-1200, могат да бъдат съоръжени както с турбина тип К-1200-6,8/50, произвеждана от ЛМЗ, Санкт Петербург, така и с турбина от серията Arabelle™, произвеждана от „Алстом“/„Атоменергомаш“ [3].

Турбина К-1200-6,8/50

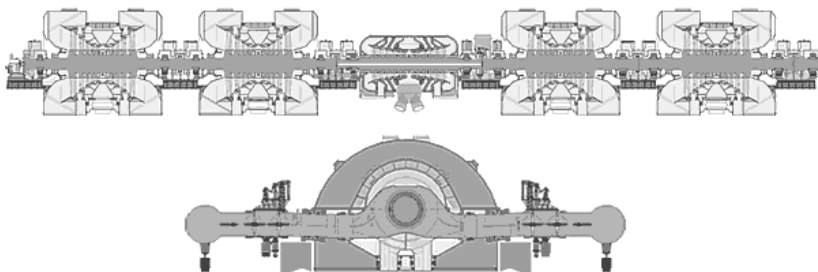
Парната турбина К-1200-6,8/50 е кондензационна, едновалова, с пет цилиндъра. Първоначалното разширение на парата се осъществява в цилиндър високо налягане, а последващото – в цилиндри ниско налягане. Между цилиндрите високо и ниско налягане се осъществява междинно сепариране и прегряване на парата.

Парата се подава от парогенераторите към турбината посредством четири независими паропровода, като на всеки от тях е монтиран стопорен и регулиращ клапан. Налягането на парата на изхода от парогенераторите е 6,8 МПа.

След като се разшири в цилиндър високо налягане, парата преминава през четири паропровода към четири независими едностепенни сепаратори-паропрегреватели. След преминаването си през цилиндри

ниско налягане, парата се отвежда към кондензаторите, по един за всеки цилиндър ниско налягане. В случай на преходен режим или в режим на пускане на енергийния блок, свежата пара се подава директно към кондензатора. След като отработената в турбината пара кондензира в кондензатора, основният кондензат се подгръва чрез регенеративната система. Подгръването в регенеративните подгръватели се осъществява чрез нерегулируеми пароотнемания от турбината. След подгръването, основният кондензат се подава в деаeratorната инсталация, където се отделят некондензиращите корозионно активни газове.

Към момента турбини от тип К-1200-6,8/50 се експлоатират в два енергоблока с реактори ВВЕР-1200, един в ЯЕЦ „Нововоронеж-2“, и един – в ЯЕЦ „Ленинград-2“ [4,7]. Турбината е изработена по проектна схема 2 ЦНН + ЦВН + 2 ЦНН, като всички са двупоточни. Общ изглед на турбината К-1200-6,8/50 е показан на Фигура 1.

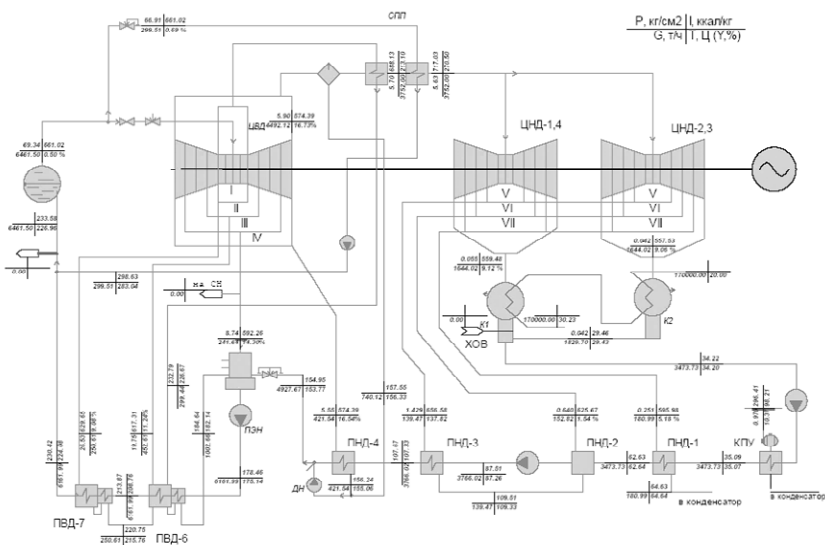


Фигура 1. Общ изглед на турбина К-1200-6,8/50 в надлъжен (горе) и напречен (долу) разрез [5]

В турбината К-1200-6,8/50 са приложени някои технически решения за повишаване на ефективността, надеждността и ремонтпригодността като [4,5,7]:

- използване в последната степен на цилиндър ниско налягане на усъвършенствани работни лопатки от титанова сплав с дължина 1200 mm. Понастоящем това са лопатките с максимална дължина, използвани при серийно произвеждани високоскоростни турбини;
- направляващите лопатки имат тангенциален наклон;
- бандажите на работните лопатки в цилиндър високо налягане са с наклонена вътрешна повърхност, която стабилизира потока на парата;

- цилиндърът високо налягане на турбината и диафрагмите са изработени от неръждаема стомана, което позволява напълно да се реши проблемът с ерозията;
- в последната степен на ЦНН са предвидени повишаване на адабатния пад, уголемяване на осевите хлабини и повишаване на вътреканалното влагоулавяне, както и е повишена якостта на ръбовете и на бандажите на работните лопатки чрез йонна имплантация на титанов нитрид;
- маслената система използва негорима течност, което подобрява пожаробезопасността;
- възможно е крайните уплътнения на цилиндър ниско налягане да бъдат демонтирани без разглобяване на цилиндъра;
- възможно е балансирането на роторите да се осъществява без отваряне на цилиндрите;
- използва се секциониран по налягане кондензатор;
- регенеративната система е усъвършенствана (7 степени), а ПНН-2 е от смесителен тип.



Фигура 2. Топлинна схема на втори контур, съоръжен с турбина K-1200-6,8/50 [5]

Отличителна черта на топлинната схема на турбинния агрегат К-1200-6,8/50 (Фигура 2) е използването на двустепенно прегряване на парата с регулируемо пароотнемане от ЦВН за прегряването ѝ, което води до увеличение на ефективността на турбинната инсталация. Проектът включва добре познати съоръжения като ПВН, ПНН, деаератор, кондензни и подхранващи помпи. ПНН-1, 3 и 4 са от повърхностен тип, а ПНН-2 е от смесителен тип. ПНН-1 е четирикорпусен, ПНН-2, 3 и 4 са еднокорпусни, а ПВН-5 и 6 са двукорпусни [4,5,7].

Основните характеристики на К-1200-6,8/50 са систематизирани в Таблица 1.

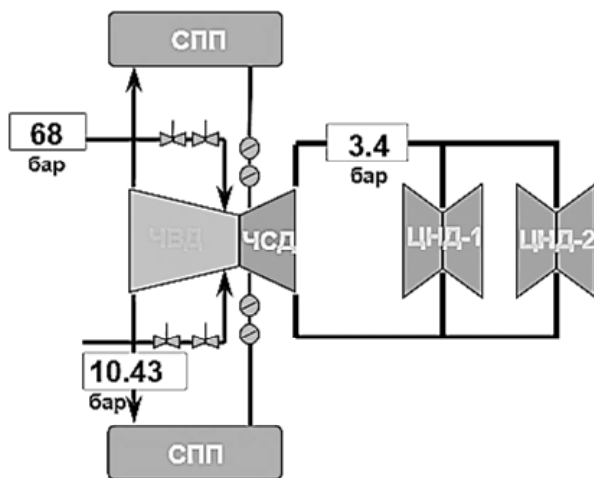
Турбина Arabelle™

Турбината Arabelle™ е бавноходна (с честота на въртене от 1500 min^{-1} (25 Hz)), едновалова с междинна сепарация и двустепенно прегряване на парата. Този тип турбини има възможност за работа с всички типове реактори, като работната електрическа мощност може да бъде в диапазона 900 – 1900 MW. Броят на цилиндрите ниско налягане се изменя в зависимост от необходимата работна мощност, като при ниския мощностен диапазон те са два, а при високия – три. За съоръжаване на енергиен блок с реактор ВВЕР-1200 се използва турбина с два цилиндъра ниско налягане. Турбина от тип Arabelle™ е разглеждана за разширението на ЯЕЦ „Темелин“ в Чехия, за ЯЕЦ „Ханхикиви“ във Финландия и е предвидена за изграждащата се Балтийска ЯЕЦ в Русия [3,6]. Турбината може да работи в маневрен режим в мощностния диапазон 100%-20%-100% [6].

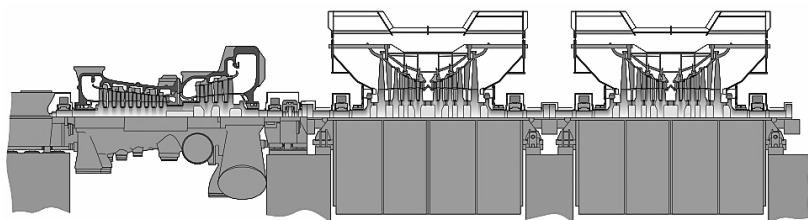
Интересна особеност на турбината Arabelle™ е комбинираният цилиндър високо и средно налягане, чиято проточна част представлява противоположно разположени в един корпус цилиндри високо и средно налягане. Около 55% от мощността, получавана от турбината, се дължи на разширението на парата в този комбиниран цилиндър високо и средно налягане (ЦВСН) [6,7]. Структурната схема ЦВСН + 2 ЦНН е изобразена на Фигура 3, а надлъжният ѝ разрез е показан на Фигура 4.

Регенеративната система е изработена по схемата: 2 ПНН-1 + 2 ПНН-2 + ПНН-3 + ПНН-4 + Д + 2 ПВН-5 + 2 ПВН-6. Отличителната характеристика на топлинната схема е, че подгревателите ПНН-1 и ПНН-2 са комбинирани в един корпус, образувайки двоен подгревател. Те, както и ПНН-3 и ПНН-4, са хоризонтални подгреватели от повърхностен

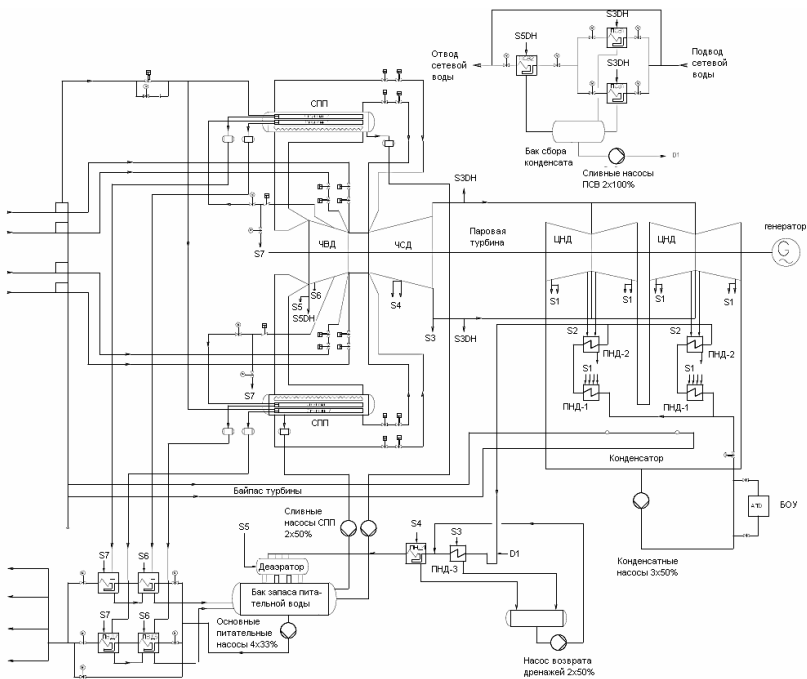
тип. Подгревателите ПНН-1 и ПНН-2 са разположени в два корпуса, включени паралелно един на друг и се намират на гърловината на изхода на кондензатора. Подгреватели ПНН-3 и ПНН-4 са в една обща група, а ПВН-5 и ПВН-6 са в две отделни групи. Подгреватели ниско налягане от 1 до 3 са изработени без охладители на дренажа. Приета е схема на едностъпално поддаване на кондензата [7].



Фигура 3. Схематичен вид на турбина Arabelle™ [6]



Фигура 4. Надлъжен разрез на турбина Arabelle™ [6]



Фигура 5. Топлинна схема на втори контур, съоръжен с турбина Arabelle™ [7]

Подаването на подхранваща вода от деаератора през ПВН в парогенератора се осъществява посредством четири подхранващи помпени агрегата, от които три са в работа, а един е в резерв. Всеки помпен агрегат се състои от основна подхранваща помпа и бустерна помпа. Смесването на кондензата на греещата пара от СПП първа и втора степен се осъществява в ПВН.

При нормален режим на работа дренажът от ПВН-7 се слива гравитачно в ПВН-6, а след това постъпва в деаератора. В аварийен режим кондензатът от ПВН-7 и от ПВН-6 се подава директно в кондензатора. Кондензатът на греещата пара от ПНН-3 и ПНН-4 се излива в дренажен резервоар, откъдето се подава в основния кондензат. От ПНН-1 и ПНН-2 кондензатът се отвежда директно в кондензатора. Всяка линия на сепаратор-паропрегревателите има отделен сепаратосборник и дренажна помпа. Кондензатът от СПП се подава директно към деаератора [7]. Принципно топлинна схема на турбинната инсталация на Arabelle™ е показана на Фигура 5.

Сравнение между K-1200-6,8/50 и Arabelle™

Турбините K-1200-6,8/50 и Arabelle™ се отличават съществено една от друга, както по разположението на цилиндрите им, така и по размер, маса, честота на въртене и абсолютен електрически к.п.д. Има отлики и в регенеративните системи на двете турбини, както и във вида, броя и масата на основното оборудване.

Сравнение на основните характеристики на турбините K-1200-6,8/50 и Arabelle™ е показано в Таблица 1, информация за регенеративните системи е обобщена в Таблица 2, а в Таблица 3 са изнесени данни за общия брой и масата на различното оборудване.

Таблица 1. Основни характеристики на турбините K-1200-6,8/50 и Arabelle™ [5-7]

Характеристика	K-1200-6,8/50	Arabelle™
Разположение на цилиндрите	2 ЦНН+ЦВН+2 ЦНН	ЦВСН + 2 ЦНН
Дължина	53,0 m	37,5 m
Маса	2540 t	1655 t
Височина на лопатката на последната степен на ЦНН	1200 mm	1430 mm
Честота на въртене	3000 min ⁻¹	1500 min ⁻¹
Температура на входа на ЦВН	283,8 °C	283,9 °C
Налягане на входа на ЦВН	6,8 MPa	6,7 MPa
Електрическа мощност	1194 MW	1197 MW
Абсолютен електрически к.п.д.	33,7%	37,3%
Срок на служба	60 год.	60 год.
Сеизмична устойчивост	6 по MSK-64	6 по MSK-64

Таблица 2. Сравнение на конструктивните схеми и регенеративните системи на турбини K-1200-6,8/50 и Arabelle™ [4-7]

	K-1200-6,8/50	Arabelle™
Конструктивна схема	2 ЦНН+ЦВН+2 ЦНН	ЦВСН+2 ЦНН
Охлаждане на генератора	водо-водно	водородно-водно
СПП	4 бр. – вертикални; разположени на кота -6,00	2 бр.- хоризонтални; разположени на кота +16,00
Регенеративна система	4 ПНН-1 + ПНН-2 + ПНН-3 + ПНН-4 + Д + 2 ПВН-5+ 2 ПВН-6	2 ПНН-1 + 2 ПНН-2+ ПНН-3 + ПНН-4 + Д + 2 ПВН-5+ 2 ПВН-6
ПНН-1	хоризонтален	двойни (ПНН-1 и ПНН-2 в общ корпус)
ПНН-2	смесителен	
ПНН-3	вертикален	хоризонтални
ПНН-4	вертикален	хоризонтални

	К-1200-6,8/50	Arabelle™
ПВН	вертикални, разположени на една линия	хоризонтални, ПВН-7 е разположен над ПВН-6
Подхранващи помпи	4 - работещи и 1 - резерв; без бустерни помпи	3 - работещи и 1 - резерв; всяка с бустерни помпи
Кондензни помпи	2 за степенчато подаване на кондензата	едностепенно подаване

Таблица 3. Брой и маса на основното оборудване [7]

Оборудване	К-1200-6,8/50		Arabelle™	
	Маса, t	брой	Маса, t	брой
Турбина	2540,0	1	1655,0	1
Генератор	600,0	1	819,0	1
Кондензатор	1910,0	1	1420,0	1
СПП	208,0	4	285,0	2
ПНН-1	21,6	4	60,0	2
ПНН-2	40,0	1	-	-
ПВН	104,0	2	58,0	2
Деаератор	213,5	1	240,0	1

По отношение на електрическата мощност двете възможности за съоръжаване на втори контур на енергиен блок с реактор ВВЕР-1200, турбините К-1200-6,8/50 и Arabelle™ не се отличават съществено. Основната разлика идва от възприетите конструктивни решения при оформянето на проточната част, които водят до съществено намаляване на масата и дължината на турбината Arabelle™ в сравнение с К-1200-6,8/50. По-ниската честота на въртене на Arabelle™ позволява в последната степен да се използват лопатки с по-голяма височина (с 230 mm по-голяма), което води и до повишаване на проходното сечение. В регенеративната система на Arabelle™ се използват и по-малко на брой подхранващи помпи, а най-значителната разлика се дължи на стойностите на абсолютния електрически к.п.д. – 33,7% при К-1200-6,8/50 и 37,3% при Arabelle™.

Източници:

[1] IAEA (2011) Advanced Reactor Information System Status Report 107, VVER-1200 (V-392M), Vienna

[2] IAEA (2011) Advanced Reactor Information System Status Report 108, VVER-1200 (V-491), Vienna

[3] Rosatom Overseas, The VVER Today. Evolution, Design, Safety, Moscow

[4] Лисянский, А.С., Н.А. Николаенков, В.В. Назаров, С.А. Иванов, Л.Я. Бальва, М.Г. Вишняков, В.В. Недавний (2010) Современные быстроходные и тихоходные паровые турбины, ОАО «Силловые машины», Санкт-Петербург.

[5] Носанкова, Л.В., А.В. Бурчева (2013) Особенности и отличия компоновки здания турбины АЭС-2006 с турбинами «Силловые Машины» и «Альстом Атомэнергомаш» на примере БТАЭС, Атомэнергoproект, Санкт-Петербург, Материалы

[6] Цветков, А.М., (2013) Турбоустановка Arabelle™ 1200 МВт для АЭС ВВЭР – Темелин-3,4, Прага

[7] 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)**

Автори:

инж. Евдокия Йорданова, студент, катедра „Топлоенергетика и ядрена енергетика“, Технически университет – София, evdokiayordanova@abv.bg
д-р инж. Ивайло Найденов, гл. асистент, катедра „Топлоенергетика и ядрена енергетика“, Технически университет – София, +359 898 597194, ivaylo.naydenov@gmail.com