

ЕНЕРГИЕН ФОРУМ 2024

МАЛКИ МОДУЛНИ РЕАКТОРИ И ПЕРСПЕКТИВИ ЗА ИЗПОЛЗВАНЕТО ИМ ПРИ ЕНЕРГИЙНИЯ ПРЕХОД В БЪЛГАРИЯ

Петър Петров

SMALL MODULAR REACTORS AND POSSIBILITIES FOR THEIR USE IN THE ENERGY TRANSITION IN BULGARIA

Petar Petrov

Abstract: The use of nuclear energy for peaceful purposes began approximately 75 years ago. Many models of different types of nuclear reactors have been designed along the years, but not all of them have reached commercial realization. Meanwhile the development of Small Modular Reactors (SMR) began about 15 years ago. Generation III and III+ reactors are currently being built, and SMR and Generation IV reactors are expected to be built in the next decade or two. Advanced nuclear technologies with minimal fuel cycle waste and SMRs are considered net-zero technologies and could replace the most environmentally polluting Coal-Firing Thermal Power Plants (CPPs). This paper provides an overview of the currently available SMR models and which ones could be used to retrofit and repower CPPs in Bulgaria, and which of them could only be used for replacement. Not only are the technologies considered, but also the level of readiness for their implementation in Bulgaria.

1. Въведение.

Използването на ядрената енергия за мирни цели започва преди около 75 години, като първата ядрена електроцентрала (ЯЕЦ) в света е пусната в експлоатация през 1954 година. Много и различни модели ядрени реактори са проектирани през годините. Някои от тях са спрени още на етап проектиране, други стигат само до експериментален модел и само ограничен брой модели достигат до серийно производство. Това се дължи на относително малкия брой ЯЕЦ в света, както и на различните изисквания в различните държави. Преди около 15 години паралелно с развитието на традиционните реактори, започва разработването на малки модулни реактори (ММР). Ядрените реактори (ЯР) се класифицират по различни признаци, като най-важни са: спрямо използваните топлоносител и забавител и спрямо общото ниво на безопасност.

В края на 2020 година в световен мащаб, 96% от реакторите в експлоатация използват лека или тежка вода за топлоносител и/или забавител [1]. От 442 ЯР в експлоатация, 68% са реактори с вода под налягане (PWR), 14% са кипящи реактори (BWR), 11% са реактори с тежка вода под налягане (PHWR), 3% са реактори с топлоносител лека вода и забавител графит (LWGR), 3% са с топлоносител газ (GCR) и едва 1% са реактори-размножители на бързи неутрони (FBR). От вида на топлоносителя зависят параметрите на работното тяло в турбината, а оттам и термичния КПД на централата. ЯЕЦ с ЯР с топлоносител вода имат нисък абсолютен електрически КПД от порядъка на 30 ÷ 33% бруто. Основната причина за това положение се корени в ниския термичен КПД на използвания термодинамичен цикъл, респ. цикъла на Ренкин. ЯЕЦ реакторите на бързи неутрони и газоохладяемите реактори с топлоносител хелий могат да достигнат 40 ÷ 45% КПД. Тези типове реактори са два от шестте прогнозни типа реактори от поколение IV, но тяхното слабо разпространение води до малко натрупан експлоатационен опит. В зависимост от общото ниво на безопасност, към настоящия момент ЯР се делят на четири поколения. Понастоящем се въвеждат в експлоатация реактори от поколения III и III+ и се очаква в близко бъдеще да се строят

реактори от поколение IV. Очаква се реакторите от четвърто поколение да са от 6 типа [2] – свръхвисокотемпературни газоохладяеми реактори (VHTR), водоохладяеми реактори със свръхкритични параметри на парата (SCWR), реактори с разтопени соли (MSR), реактори на бързи неутрони с топлоносител натрий (SFR), реактори на бързи неутрони с топлоносител олово (LFR) и реактори на бързи неутрони с топлоносител газ (GFR), като само VHTR и SFR са познати донякъде, а ММР от LFR тип е на етап строителство. VHTR са следващата стъпка в развитието на високотемпературните газоохладяеми реактори (HTGR) с топлоносител хелий. MSR са в разработка от 60-те години на XX век, но все още са изправени пред редица препятствия [3].

ЯЕЦ могат да се класифицират и по електрическата си мощност и биват с голяма, средна и малка мощност [4] (Таблица 1). Тази класификация не е общоприета и е базирана на реакторите с топлоносител вода, т.е. топлинната мощност е при к.п.д. 33%.

Таблица 1. Класификация на ЯЕЦ според мощността

	Електрическа мощност, MWe	Топлинна мощност, MW
ЯЕЦ с голяма мощност	>600	>1800
ЯЕЦ със средна мощност	300 ÷ 600	900 ÷ 1800
ЯЕЦ с малка мощност	≤300	<900

Съществува и подгрупата на т. нар. микрореактори, които според Международната агенция за атомна енергия, са ЯЕЦ с електрическа мощност до 10 MWe, а според друга класификация са с мощност до 50 MWe [4].

В последните години с развитието на ММР тази класификация се променя, като ЯР се разделят на две основни групи – типични големи енергийни реактори с мощност над и под 600 MWe на съответната ЯЕЦ. ЯЕЦ с ММР от поколение III+ или IV са електрическа мощност до 350 MW с малки изключения. Въпреки тяхното име, не всички ММР са от модулен тип, но поради относително малките си размери и тегло, те могат да бъдат сглобявани на място в завода производител и след това доставяни сглобени на площадката.

Ядрените технологии са наречени стратегически за европейската декарбонизация, като подобрените ядрени технологии с минимален отпадък от горивния цикъл и ядрените технологии с ММР се считат за технологии с нулеви нетни емисии, съгласно Законодателен акт за промишленост с нулеви нетни емисии на Европейската комисия [5]. Политиката за въглеродна неутралност до 2050 година налага спирането и замяната от страните, ратифицирали Парижкото споразумение, сред които е и България като част от Европейския съюз, на най-замърсяващите околната среда електро-произвеждащи мощности, за каквито се считат топлоелектрическите централи, изгарящи въглища (ВТЕЦ) [6]. Един от вариантите за замяната им е трансформирането им в ЯЕЦ (coal-to-nuclear, C2N). Подходящи за тази цел са технологиите използващи ММР и моделът БН-800 от големите ЯР [7]. Възможни са 3 варианта на C2N – „цялостна замяна“ (използва се площадката със спомагателните съоръжения, на която се разполага нов ядрен енергиен блок), „замяна на източника на енергия“ (заменя се парогенераторът (ПГ) от ВТЕЦ с ядрена паро-производителна инсталация (ЯППИ) и в общия случай се променя топлинната схема, заради междинното прегряване на парата) и „промяна на мощността“ (заменя се ПГ от ВТЕЦ с ЯППИ, която произвежда пара с по-ниски параметри от тези, с които работи съществуващата парна турбина, което води до промени в нея, респ. с преминаването ѝ на работа с по-ниска мощност). Проблемът е, че голяма част от ММР са в процес на разработване, като някои вече са спрени, а малка част от тях са лицензирани. Няколко са в процес на строителство, като само един е пуснат в експлоатация. Известен брой се намират в т.нар предлицензионна процедура, което е предварителна оценка на части от проекта, която извършват само регулаторните органи на САЩ и Канада.

В настоящата публикация са разгледани наличните и разработваните модели ММР и са въведени критерии за селекция на най-подходящите за С2N трансформации, и най-вече за „замяна на източника на енергия“ или за „промяна на мощността“. Също така е направена първоначална оценка за възможността за използването им за С2N в Р. България.

2. Общи характеристики на наличните ядрени технологии и тяхната приложимост при С2N.

Лицензираните и в процес на лицензиране ММР се групират в зависимост от използваните топлоносител и/или забавител, от които зависят параметрите на произведената пара и термичния к.п.д. на съответния модел ММР. От параметрите на произведената пара зависи доколко ЯППИ може да замени ПГ от ВТЕЦ, а от термодинамичните параметри на работното тяло и неговият дебит – топлинната мощност на турбината, поради което са и най-важни при обмислянето на вариантите на С2N „замяна на източника на енергия“ или „промяна на мощността“, т.е. с използване на паротурбинната инсталация (ПТИ) от ВТЕЦ. Оттам и моделите ЯР могат да се групират в 3 групи в зависимост от параметрите на произвежданата пара: с „високи параметри“, със „средни параметри“ и с „ниски параметри“ (Таблица 2).

Таблица 2. Класификация на ЯППИ в зависимост от параметрите на произвежданата пара

	Температура, °С	Налягане, МПа
ЯППИ с „високи параметри“	>540	>13
ЯППИ със „средни параметри“	450 ÷ 510	>13
ЯППИ с „ниски параметри“	270 ÷ 350	<8

^aТаблицата се базира на наличните и разработваните модели към момента ММР и може да не е точна в бъдеще.

Трябва да се има предвид също, че едноконтурните реактори, които са без типичен парогенератор, са подходящи само за варианта „цялостна замяна“, тъй като през реактора и турбината преминава едно и също работно тяло и използването на друга турбина освен проектната е практически невъзможно.

ВТЕЦ в експлоатация или наскоро спрени се класифицират според параметрите на произвежданата пара и могат да се представят в четири групи [8], но за целите на настоящото проучване ще бъде добавена и пета група (Таблица 3).

Таблица 3. Класификация на ВТЕЦ в зависимост от параметрите на произвежданата пара

	Температура, °С	Налягане, МПа
ВТЕЦ с високи параметри	≤545	12 ÷ 14
ВТЕЦ с подсвръхкритични параметри	545 ÷ 565	16 ÷ 17
ВТЕЦ със свръхкритични параметри	565 ÷ 580	22 ÷ 24
ВТЕЦ с надсвръхкритични параметри	595 ÷ 620	25 ÷ 34
ВТЕЦ с ултрасвръхкритични параметри	>705	>34

Използвайки обемните разходи и енталпийните падове, може с достатъчна точност да се определи на колко процента от номиналната си мощност би могла да работи ПТИ, заменяйки даден ПГ с ЯППИ. Прилагайки консервативен подход се приема, че на изхода на турбината влагосъдържанието е 0% за ВТЕЦ, ЯППИ с „високи параметри“ и ЯППИ със „средни параметри“ и 10% за ЯППИ с „ниски параметри“, а температурата на парата на изхода на турбината е 25 °С. Приравнявайки обемните разходи на пара у-ние (1) от ПГ и ЯППИ, т.е. запазвайки максимално режима на работа на турбината, се получава съотношението на масовите дебети. Сравнявайки вътрешната мощност (2), може да се получи на колко процента от номиналната си мощност би могла да работи ПТИ, заменяйки даден ПГ с ЯППИ от даден модел ЯР.

$$Q = \frac{D}{\rho} = v \cdot D, \quad (1)$$

където: Q е обемният разход;
D – масовият разход;
 ρ – плътността;
v – специфичният обем.

$$P = D \cdot (h' - h''), \quad (2)$$

където: P е вътрешната мощност на турбината;
h' – енталпията на парата на входа на турбината;
h'' – енталпията на парата на изхода от турбината.

2.1. Модели ЯР с „високи параметри“ на произвежданата пара.

Към настоящия момент, в тази група попадат HTGR и MSR MMP-и, които биха били подходящи за вариантите „замяна на източника на енергия“ и „промяна на мощността“. Това са моделите HTR-PM, Xe-100, KP-FHR, SSR-W300 и IMSR400 [7]. Директна замяна на ПГ от ВТЕЦ с ЯППИ е невъзможна, поради организацията на междинното прегряване на парата във ВТЕЦ, което се осъществява в ПГ. Вероятно ЯППИ с някои модели MMP като KP-FHR ще позволяват междинно прегряване подобно на това във ВТЕЦ [9], но те ще са по-скоро изключение. Очаква се ЯППИ и MSR моделите да произвеждат пара с минимална температура от 570 °C и високо налягане от порядъка на 19 MPa [9,10,11]. Предвижда се да използват за гориво високообогащен уран, като в случая на KP-FHR обогатяването ще е приблизително 19,5%, което ще осигури маневреност на реактора. Въпреки положителните си характеристики за C2N, MSR моделите са неприложими, докато не преодолеят проблемите относно лицензирането си [3].

Моделът HTR-PM е HTGR от басейнов тип. Топлинната му мощност е 500 MW (два реактора с мощност 250 MW всеки), електрическата мощност на енергийния блок – 211 MW, а нетната 200 MWe. Горивото е UO₂ с обогатяване по ²³⁵U 8,5%, което е вградено под формата на микроелементи в графитен забавител със сферична форма. Средният престой на графитните сфери, съответно горивото в реактора е 1057 дни, като подмяната им става при работещ реактор. Така разположено горивото и с това обогатяване, позволява определена гъвкавост за промяна на мощността на реактора. Топлоносителят е хелий под налягане 7 MPa, който се загрява в реактора от 250 до 750 °C. Първи контур се състои от 3 кръга и съответно има 3 парогенератора. Те произвеждат прегрята пара с температура 566 °C, налягане 13,24 MPa и общ дебит 186,39 kg/s. Проектният му живот е 40 години [12]. Той отговаря на всички характеристики на реактор четвърто поколение – висока икономичност, повишена безопасност, минимално количество отпадъци и намален риск за използване на ядрен материал за оръжейни цели, като едно от предназначенията му е за използване при C2N [13]. Също би могъл да се използва за когенерация и производството на водород [13]. Въпреки много малкия си брой, HTGR модели са в експлоатация от десетилетия и може да се каже, че са по-малко рисковата технология от двете експлоатирани технологии част от четвърто поколение.

В табл. 4 е дадено какъв процент от номиналната мощност на ПТИ на 4 примерни ВТЕЦ могат да осигурят моделите HTR-PM и IMSR400.

Таблица 4. Използваемост на ЯР с „високи параметри“ на произвежданата пара за C2N

	HTR-PM, %	IMSR400, %
ВТЕЦ с t = 545 °C и p = 14 MPa	97,0	139,0
ВТЕЦ с t = 565 °C и p = 17 MPa	79,0	113,5

ВТЕЦ с $t = 580\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $p = 24\text{ MPa}$	56,7	81,0
ВТЕЦ с $t = 620\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $p = 34\text{ MPa}$	39,6	56,8

От получените резултати се вижда, че на този етап най-оправдано е използването на модела НТН-РМ за варианта „замяна на източника на енергия“ при ВТЕЦ с високи параметри на произвежданата пара.

2.2. Модели ЯР със „средни параметри“ на произвежданата пара.

Тази група към момента включва модели на реактори-размножители с топлоносител течен метал, тоест LFR и SFR модели ММР, както и моделът БН-800. Почти всички модели са с топлоносител течен натрий – CFR-600, БН-800, ARC-100, PRISM и Natrium [7], и един е с топлоносител разтопено олово – БРЕСТ [7]. Това са маневрени реактори, тъй като обикновено използват урано-плутониево гориво и са с висок коефициент на възпроизводство – 1 до 1,2. Предвиденият експлоатационен живот е поне 30 години: БРЕСТ – 30 години, БН-800 – 40 години, CFR-600 – 60 години. Поради голямата си мощност моделът БН-800 е използваем най-вече за варианта „цялостна замяна“. SFR моделите са отдавна в експлоатация, но много малко на брой, поради рисковата си технология, а това се дължи най-вече на физичните и химичните свойства на натрия. Моделът БРЕСТ ще е първият LFR в света, което означава липса на експлоатационен опит с такъв тип реактори.

В табл. 5 са систематизирани данни за примерни ВТЕЦ, относно процентът от номиналната мощност на ПТИ, който могат да осигурят моделите БРЕСТ, БН-800 и CFR-600.

Таблица 5. Използваемост на ЯР със „средни параметри“ на произвежданата пара за С2N

	БРЕСТ, %	БН-800, %	CFR-600, %
ВТЕЦ с $t = 545\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $p = 14\text{ MPa}$	112,6	90,7	90,8
ВТЕЦ с $t = 565\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $p = 17\text{ MPa}$	91,7	73,8	73,9
ВТЕЦ с $t = 580\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $p = 24\text{ MPa}$	65,7	52,9	53,0
ВТЕЦ с $t = 620\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $p = 34\text{ MPa}$	45,9	36,9	37,0

Получените резултати, както и рисковата SFR технология и непознатата LFR правят тази група ЯР на този етап по-скоро неприложима за С2N. В бъдеще повечето модели от тази група биха могли да се използват за варианта „промяна на мощността“ и единствено моделът БРЕСТ би могъл да се използва за „замяна на източника на енергия“ в отделни случаи, като може да са необходими допълнителни якостни пресмятания, поради високото налягане на произвежданата пара – 17 MPa.

2.3. Модели ЯР с „ниски параметри“ на произвежданата пара.

Към настоящия момент в тази група влизат PWR и BWR модели ММР-и. Това са моделите BWXR-300, ACP-100, CAREM25, VOYGR, SMART, Holtec SMR-160, Holtec SMR-300, AP300, КЛТ-40С, РИТМ-200Н, CAREM и Rolls-Royce SMR (UK SMR) [7]. BWXR-300 е кипящ реактор, тоест едноконтурен, което го прави приложим единствено за варианта „цялостна замяна“. ЯППИ с тези модели произвеждат суха наситена или слабо прегрята пара. Друга тяхна особеност е, че работят с гориво UO_2 с обогатяване до 5%, което ги прави неманеврени и подходящи единствено да покриват базовия товар на енергийната система. Единствените маневрени реактори от тази група към настоящия момент са моделите КЛТ-40С и РИТМ-200Н, които работят с гориво с обогатяване до 20%.

В табл. 6 са представени данни за процента от номиналната мощност на ПТИ на примерни ВТЕЦ, който могат да осигурят моделите UK SMR, SMART, VOYGR и РИТМ-200Н.

Таблица 6. Използваемост на ЯР (ЯПШ) с „ниски параметри“ на произвежданата пара за С2N

	UK, %	SMART, %	VOYGR, %	РИТМ-200Н, %
ВТЕЦ с $t = 545$ °С и $p = 14$ МПа	50,6	38,5	28,3	29,0
ВТЕЦ с $t = 565$ °С и $p = 17$ МПа	41,0	31,3	23,0	23,6
ВТЕЦ с $t = 580$ °С и $p = 24$ МПа	29,5	22,5	16,5	16,9
ВТЕЦ с $t = 620$ °С и $p = 34$ МПа	20,6	15,7	11,5	11,8

От получените резултати ясно се вижда, че моделите от тази група са подходящи за варианта „цялостна замяна“ и, че моделите, които произвеждат суха наситена пара, са по-удачния избор за варианта „промяна на мощността“. Проблемът е, че използването на кой да е от тези модели при „промяна на мощността“ ще наложи реконструкция на турбината за работа с влажна пара и тяхното използване в този случай има смисъл от изследователска гледна точка и за евентуално удължено използване на остатъчния ресурс на турбината. Вторият вариант е най-вече оправдан при използване на модела UK SMR. Този модел е с проектен срок на експлоатация 60 години и се очаква да издържа на земетресение с максимално ускорение $>0,3g$ [14]. ЯЕЦ с този модел ще е с мощност 470 MWe, което означава, че трябва да захранва турбина или турбини със съответните номинални параметри с номинална мощност под 230 MWe.

3. Подходящи модели ММР за С2N в Р. България

В Р. България има четири големи ВТЕЦ, които биха могли да се заменят с ЯЕЦ. Това са ТЕЦ „Бобов дол“ (БД), ТЕЦ „Ей И ЕС-3С Марица Изток 1“ (МИ1), ТЕЦ „Марица Изток 2“ (МИ2) и ТЕЦ „КонтурГлобал Марица Изток 3“ (МИ3). Важните характеристики и параметри на парните им турбини са дадени в табл. 7 [15,16].

Таблица 7. Параметри на парните турбини (ПТ) в България, с възможност за използване при С2N

ТЕЦ	Години	брой	Мощност, MWe	Разход, т/ч	Температура, °С	Налягане, МПа
БД	50	3	210	640	545	13,75
МИ1	13	2	335	1000	540	18,00
МИ2	16	3	205	480	540	12,75
МИ2	24	1	165	480	540	12,75
МИ2	37	2	210	636	540	12,75
МИ2	32	2	215	636	540	12,75
МИ3	45	4	227	636	540	12,75

От данните се вижда, че повечето налични ПТ в България работят със свежа пара с температура 540 °С и налягане 12,75 МПа. Също така, повечето от тях са работили над 20 години, което не дава основание да се смята, че имат достатъчен остатъчен ресурс. Трябва да се има и предвид, че четирите турбини в МИ3 и двете 210 мегаватови и двете 215 мегаватови турбини в МИ2 са реновирани в част цилиндър ниско налягане (ЦНН) преди 15 ÷ 18 години.

В съответствие с получените резултати в предходната точка, мощността на моделите ММР и мощността на ПТ, в табл. 8 е дадено какъв процент от номиналната мощност на ПТИ за турбините в България, работили по-малко от 40 години, могат да осигурят моделите НТР-РМ, БРЕСТ, UK SMR, CFR-600 и Хе-100, като последният модел е с мощност 87 MWe и ще произвежда пара с температура 565 °С, налягане 16,5 МПа и разход 76,8 kg/s [17].

Таблица 8. Използваемост на ПТ в България при С2N

	UK, %	НТР-РМ, %	БРЕСТ, %	CFR-600, %	Хе-100, %
ПТ с $t = 540$ °С и $p = 18$ МПа	40,4	77,6	72,4	72,5	95,4
ПТ с $t = 540$ °С и $p = 12,75$ МПа	55,6	106,7	99,6	99,8	131,0

От получените резултати се вижда, че 205 мегаватова турбина би могла да работи на поне 100% от номиналната си мощност с модела HTR-PM, 335 мегаватова турбина може да работи на поне 95% от номиналната си мощност с 4 реактора от модела Xe-100, моделът Rolls-Royce SMR може да работи на номинална мощност (470 MWe), захранвайки с пара едновременно двете 210 мегаватова турбини и двете 215 мегаватова турбини от МИ2, и че на този етап няма достатъчно подходящ модел ММР за 165 мегаватова турбина.

По-детайлните пресмятания с отчитане на разхода на пара за модела HTR-PM с 205 мегаватова турбина с температура 540 °С и налягане 12,75 МРа и за модела Xe-100 с 335 мегаватова турбина с температура 540 °С и налягане 18 МРа, показват, че междинният прегрев е осъществим и температурата на парата след него би достигнала поне 540 °С, което прави първоначалното допускане за междинния прегрев вярно. Тези сметки потвърждават и първият резултат, че 205 мегаватова турбина би могла да работи на поне 100% от номиналната си мощност с модела HTR-PM, но занижават на 90% мощността, на която ще може да работи 335 мегаватова турбина с 4 реактора от модела Xe-100. Последното се обяснява с почти еднакви параметри на парата, произведена в ПГ на ВТЕЦ и от ММР, в ЦНН на турбината, а разходът на пара в двата случая е доста различен. Трябва да се има предвид, че това са предварителни оценки, без да се отчитат подробно характеристиките на проточната част на турбината и регенеративната ѝ система. Такива пресмятания за модела Rolls-Royce SMR няма да са точни, поради това че няма данни за разхода на произведената от него пара и ПТ от ВТЕЦ е проектирана да работи с прегрята пара, а този модел ММР произвежда суха наситена пара.

4. Изводи.

ММР са нова технология в начален етап на развитие и има само един реактор в експлоатация и един, който е построен, но няма данни да е свързан с електрическата мрежа. Има сигурни данни само за два модела, че една от целите при проектирането им, е за използване при С2N – HTR-PM и КР-FHR. Положителното е, че моделът HTR-PM е пуснатият в експлоатация, но за сметка на това пред модела КР-FHR има все още много препятствия преди въвеждането му в експлоатация. И двата модела са подходящи за варианта „замяна на източника на енергия“ при част от ВТЕЦ, който по първоначални оценки е и икономически най-изгодният. Моделът HTR-PM е най-добрият кандидат за използване при С2N към настоящия момент. Други модели, които биха могли да се използват на този етап, но при доста голям риск, са БРЕСТ и Rolls-Royce SMR, като първият би могъл да се използва основно за варианта „промяна на мощността“, но трябва да се има предвид, че това е първият модел LFR и няма никакъв експлоатационен опит на световно ниво, а вторият би могъл да се използва за евентуално удължаване на срока на експлоатация на ПТИ, като турбината ще работи с около 50% процента от номиналната си мощност. SFR моделите биха могли да се използват за варианта „промяна на мощността“, но бързите реактори с натриев топлоносител са много рискова и слабо позната технология, въпреки дългогодишната си експлоатация, което е голяма пречка за използването им при С2N. Всички модели биха могли да се използват за варианта „цялостна замяна“, стига площадката, заемана от ВТЕЦ, да отговаря на изискванията за разполагане на ЯЕЦ.

На този етап в Р. България има 3 възможности за С2N с използване на ПТИ. Първият е на модела HTR-PM с турбина 205 MW от ТЕЦ „Марица Изток 2“, вторият – на 4 реактора от модела Xe-100 с турбина 335 MW от ТЕЦ „ЕИ И ЕС-3С Марица Изток 1“, а третият – на Rolls-Royce SMR, който да захранва с пара едновременно двете турбини 210 MW и двете 215 MW от ТЕЦ „Марица Изток 2“. Четирите турбини от третия вариант ще работят с ниски параметри и номинален дебит, а и оттам с около 55% от номиналната си мощност. Работата на доста по-ниски параметри би трябвало да удължи значително експлоатационния им срок, като обаче преди това трябва да бъдат пригодени за работа с влажна пара. Освен това, България би била подготвена най-много за третия вариант, след като експлоатира реактори с вода под налягане макар и от различен вид.

5. Списък на литературните източници.

- [1] Nuclear Power Reactors in the World. Наличен онлайн: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/RDS-2-41_web.pdf. Дата на достъп 12.04.2024 г.
- [2] https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_59461/generation-iv-systems. Дата на достъп 14.05.2024 г.
- [3] IAEA Technical Reports Series No. 489 Status of Molten Salt Reactor Technology. Наличен онлайн: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/STI-DOC-010-489_web.pdf. Дата на достъп 14.05.2024 г.
- [4] Ronald King Consulting, From Coal to Nuclear: A Practical Guide for Developing Nuclear Energy Facilities in Coal Plant Communities. Наличен онлайн: <https://restservice.epri.com/publicdownload/000000003002026517/0/Product>. Дата на достъп 12.04.2024 г.
- [5] Регламент на европейския парламент и на съвета за създаване на рамка от мерки за укрепване на европейската екосистема за производство на продукти в областта на технологиите за нулеви нетни емисии (законодателен акт за промишленост с нулеви нетни емисии). Наличен онлайн: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/BG/TXT/HTML/?uri=CELEX:52023PC0161>. Дата на достъп 29.04.2024 г.
- [6] Закон за ратифициране на Споразумението от Париж към Рамковата конвенция на Обединените нации по изменение на климата и за приемане на декларация по чл. 9, параграф 1 от споразумението. Наличен онлайн: https://parliament.bg/bills/43/602-02-34_ZR_Sporazumenieto_ot_Parizh_po_izmenenie_klimata.PDF. Дата на достъп 29.04.2024 г.
- [7] P. Petrov and S. Boycheva, Opportunities and challenges of converting coal-fired power plants to nuclear power plants. Докладвана на 29-та конференция на ЕМФ, 14-15 май 2024 г.
- [8] A. Nair and S. Kumanan, Newer Materials for Supercritical Power Plant Components – A Manufacturability Study. Proceedings of the International Conference on Advances in Production and Industrial Engineering (INCAPIE_2015), NIT Trichy, At: 326-332. Наличен онлайн: https://www.researchgate.net/publication/301294683_Newer_Materials_for_Supercritical_Power_Plant_Components_-_A_Manufacturability_Study. Дата на достъп 17.05.2024 г.
- [9] <https://kairospower.com/technology/>. Дата на достъп 14.05.2024 г.
- [10] https://ressources-naturelles.canada.ca/sites/nrcan/files/energy/energy-resources/Moltex_-_SSR_-_Low_cost_nuclear_power.pdf. Дата на достъп 14.05.2024 г.
- [11] Status Report – IMSR-400. Наличен онлайн: <https://aris.iaea.org/PDF/IMSR400.pdf>. Дата на достъп 14.05.2024 г.
- [12] Status report 96 – High Temperature Gas Cooled Reactor – Pebble-Bed Module (HTR_PM). Наличен онлайн: <https://aris.iaea.org/PDF/HTR-PM.pdf>. Дата на достъп 17.05.2024 г.
- [13] Li Fu, Chinese HTR Program. Наличен онлайн: https://www.ifnec.org/ifnec/upload/docs/application/pdf/2019-09/2-3_chinese_htr_program-lifu-1909_new.pdf. Дата на достъп 14.05.2024 г.
- [14] Status report – UK SMR (Rolls-Royce and Partners, United Kingdom 2019/09/30). Наличен онлайн: https://aris.iaea.org/PDF/UK-SMR_2020.pdf. Дата на достъп 14.05.2024 г.
- [15] Н. Набатов, Д. Тафров, Т. Христова, К. Кънев, Й. Попов, С. Симеонов, Н. Пеловски, И. Айолов, Е. Харитоновна М. Дичева и Й. Йовчев, Електроенергетиката на България. ISBN 978-954-378-081-5.
- [16] Г. Стайков, ТЕЦ „Марица Изток 2“ – Справочник за ремонт на турбини. ISBN 978-954-9387-63-6.
- [17] X-Energy. Наличен онлайн: <https://www.nice-future.org/docs/nicefuturelibraries/default-document-library/x-energy.pdf>. Дата на достъп 18.05.2024 г.

Благодарност

Авторът изразява своята признателност към Научноизследователския сектор при Технически университет – София за финансирането на това изследване по договор № 242ПД0050-02.

Автор:

Петър Петров, ас. инж., Технически университет – София, E-mail: pnpetrov@tu-sofia.bg

МАЛКИ МОДУЛНИ РЕАКТОРИ И ПЕРСПЕКТИВИ ЗА ИЗПОЛЗВАНЕТО ИМ ПРИ ЕНЕРГИЙНИЯ ПРЕХОД В БЪЛГАРИЯ

ас. инж. Петър Николов Петров

Резюме: Използването на ядрената енергия за мирни цели започва преди около 75 години, като първата ядрена електроцентрала (ЯЕЦ) в света е пусната в експлоатация през 1954 година. Много и различни модели от различни типове ядрени реактори са проектирани и пуснати в експлоатация през годините, а преди около 15 години започва разработването и на малките модулни реактори (ММР). Към настоящия момент се въвеждат в експлоатация реактори от поколения III и III+ и се очаква в близко бъдеще да се строят реактори от четвърто поколение и ММР. Подобрените ядрени технологии с минимален отпадък от горивния цикъл и ММР се считат за технологии с нулеви нетни емисии и могат да заменят най-замърсяващите околната среда електропроизвеждащи мощности, за каквито се считат топлоелектрическите централи, изгарящи въглища (ВТЕЦ). Възможни са три варианта за трансформирането на ВТЕЦ в ЯЕЦ (С2N) – „цялостна замяна“ (използва се площадката със спомагателните съоръжения на нея и там се разполага ядрен енергиен блок), „замяна на източника на енергия“ (заменя се парогенераторът от ВТЕЦ с ЯР и в общия случай се променя топлинната схема, заради междинното прегряване на парата) и „промяна на мощността“ (заменя се парогенераторът от ВТЕЦ с ЯР, който произвежда пара с доста по-ниски параметри от тези, с които работи турбината, което води до промени в нея и преминаването ѝ на работа на доста по-ниска мощност). Настоящата статия разглежда лицензираните и в процес на лицензиране ММР и дава предварителна оценка кои от тях за какъв вариант на С2N са подходящи. ММР са разделени спрямо параметрите на произведената от тях пара на: модели с „високи параметри“ на произвежданата пара, модели със „средни параметри“ на произвежданата пара и модели с „ниски параметри“ на произвежданата пара. В общия случай моделите с „високи параметри“ на произвежданата пара са подходящи за варианта „замяна на източника на енергия“, моделите със „средни параметри“ на произвежданата пара за варианта „промяна на мощността“ и моделите с „ниски параметри“ на произвежданата пара само за варианта „цялостна замяна“. Разглежда се и оборудването във ВТЕЦ в България с остатъчния ресурс на паротурбинните инсталации и се прави първоначална оценка какъв вариант на С2N би бил най-удачен за всяка от тях и с какви модели ММР може да се осъществи, като се отчита и степента на готовност за прилагането на тези модели ЯР в Р. България.