

УДК 621.039

## ПОЛУЧЕНИЕ СУПЕРСВЕРХКРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПАРА НА АЭС ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПРЕССИИ И НЕЯДЕРНОГО ПЕРЕГРЕВА ПАРА

**В. С. Костарев<sup>1</sup>, И. А. Ширманов<sup>2</sup>, Д. Н. Литвинов<sup>3</sup>,  
А. А. Аникин<sup>4</sup>, С. Е. Щеклеин<sup>5</sup>**

<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup> Уральский федеральный университет имени первого  
Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

<sup>1</sup> slavalkostarev@yandex.ru

**Аннотация.** В работе представлены результаты компьютерного моделирования вариантов тепловых схем атомных электростанций (АЭС) с реакторами ВВЭР-1200, БН-1200 и БРЕСТ-ОД-300 с использованием огневого перегрева пара, а также паровой компрессии для получения суперсверхкритических параметров пара, проведена оценка эффективности использования таких тепловых схем.

**Ключевые слова:** тепловая схема АЭС, термодинамическая эффективность, суперсверхкритические параметры пара, ВВЭР-1200, БН-1200, БРЕСТ-ОД-300.

## ON THE POSSIBILITY OF APPLICATION OF COMPRESSION AND NON-NUCLEAR STEAM SUPERHEATING FOR OBTAINING ULTRA-SUPERCRITICAL STEAM PARAMETERS AT NPPS

**V. S. Kostarev<sup>1</sup>, I. A. Shirmanov<sup>2</sup>, D. N. Litvinov<sup>3</sup>,  
A. A. Anikin<sup>4</sup>, S. E. Shcheklein<sup>5</sup>**

<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup> Ural Federal University named after the First  
President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

<sup>1</sup> slavalkostarev@yandex.ru

**Abstract.** The paper presents the results of computer simulation of options for thermal schemes of NPPs with WWER-1200, BN-1200 and BREST-OD-300 re-

actors using fire superheating of steam, as well as steam compression to achieve super-supercritical steam parameters, and an assessment of the efficiency of using thermal parameters.

**Keywords:** thermal circuit of nuclear power plants, thermodynamic efficiency, ultra-supercritical steam parameters, WWER-1200, BN-1200, BREST-OD-300

В настоящее время мировая теплоэнергетика уже начала переход на суперсверхкритические параметры пара, что позволяет увеличить коэффициент полезного действия (КПД) и снизить расход топлива, и, соответственно, сбросы вредных веществ в окружающую среду. В настоящее время атомные и тепловые электрические станции составляют большую часть энергетической системы России — 81,7 % по состоянию на 2019 г. [1].

Для повышения энергоэффективности атомных электростанций (АЭС) рассматриваются многочисленные инновационные проекты, такие как реакторы на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем (БН-600, БН-800, проектируемый БН-1200), а также реактор со свинцовым теплоносителем БРЕСТ-ОД-300, сооружаемый в настоящее время в г. Северске на площадке Сибирского химического комбината. Такие реакторы являются инновационными проектами, способными положительно повысить экологическую, энергетическую и экономическую эффективность атомной энергетики.

В настоящей работе представлены результаты моделирования различных вариантов тепловых схем реакторов ВВЭР-1200, БН-1200, БРЕСТ-ОД-300 (стандартный цикл; стандартный цикл с начальным огневym перегревом пара; цикл с компрессией и одноступенчатым промежуточным огневym перегревом пара; цикл с компрессией и двухступенчатым промежуточным огневym перегревом пара; цикл с компрессией, начальным и одноступенчатым промежуточным огневym перегревом пара; цикл с компрессией, начальным и двухступенчатым промежуточным огневym перегревом пара) при помощи системы автоматизированного проектирования (САПР) United Cycle. Целью работы является определение наиболее эффективного варианта модификации тепловой схемы АЭС с БН-1200 (применение компрессии и неядерного огневого перегрева пара для поручения суперсверхкритических параметров пара) с термодинамической точки зрения.

Современный уровень развития энергетического машиностроения, благодаря которому стало возможно создание высокотемпературных

паровых турбин, рассчитанных на суперсверхкритические параметры пара ( $P = 30$  МПа,  $t = 650$  °С), и паровых компрессоров, сделал возможным широкое применение в теплоэнергетике циклов на подобных параметрах пара [2–4].

Для решения задач моделирования тепловых схем АЭС использовался программный пакет САПР United Cycle, предназначенный для решения задач и определения наилучшей структуры и состава оборудования теплоэнергетического объекта и расчета стационарных эксплуатационных режимов работы [5; 6].

В САПР United Cycle были построены несколько потенциально возможных вариантов тепловых схем для их дальнейшего расчета. Рассматривались следующие варианты:

- 1) тепловая схема реакторной установки со стандартными параметрами;
- 2) тепловая схема РУ со стандартными параметрами и начальным огневым перегревом пара (до 650 °С);
- 3) схема с компрессией (до 30 МПа) и одним промежуточным перегревом пара (до 650 °С);
- 4) схема с компрессией (до 30 МПа), начальным и двумя промежуточными перегревами пара (до 650 °С).

Для реактора ВВЭР-1200 по причине понижения начальных параметров были также рассчитаны два дополнительных варианта:

- 1) схема с компрессией (до 30 МПа), начальным и одним промежуточным огневым перегревом пара (до 650 °С);
- 2) схема с компрессией (до 30 МПа) и двумя промежуточными перегревами пара (до 650 °С).

Результаты показали, что при понижении начальных параметров термодинамического цикла ВВЭР-1200 до  $t = 250$  °С,  $P = 3,98$  МПа с последующим сжатием до 30 МПа и огневым перегревом до 650 °С электрическая мощность увеличится на 50 %, КПД нетто увеличится на 20 %, а глубина выгорания топлива увеличится на 3 % по сравнению со стандартным циклом установки, что позволит повысить термодинамическую эффективность цикла и увеличить продолжительность топливной кампании.

Понижение начальных параметров пара на легководных АЭС является оправданным мероприятием, поскольку позволяет уменьшить давление в корпусе реактора и повысить глубину выгорания топлива.

При применении в тепловой схеме реактора БН-1200 компрессии пара и его последующего промежуточного неядерного (огневого) перегрева после цилиндра высокого давления (ЦВД) электрическая мощность установки увеличится на 50 %, а КПД нетто увеличится на 5 % по сравнению со стандартным циклом установки, что также приводит к значительному повышению термодинамической эффективности цикла.

Аналогично при применении в тепловой схеме реактора БРЕСТ-ОД-300 компрессии и огневого перегрева пара электрическая мощность установки увеличится на 24,84 %, а КПД нетто увеличится 3,82 % по сравнению со стандартным циклом установки.

Таким образом, применение компрессии и неядерного (огневого) перегрева пара для получения суперсверхкритических параметров на АЭС с рассматриваемыми типами реакторов позволяет значительно повысить электрическую мощность, вырабатываемую АЭС, а также коэффициент полезного действия. Дальнейшее совершенствование термодинамического цикла легководных АЭС является весьма эффективным с термодинамической точки зрения.

### Список источников

1. Отчет о функционировании ЕЭС России в 2019 году [Электронный ресурс] // Системный оператор Единой энергетической системы. 2019. 18 с. URL: [https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/reports/disclosure/2020/ups\\_rep2019.pdf](https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/reports/disclosure/2020/ups_rep2019.pdf) (дата обращения: 06.12.2020).
2. Касилов В. Ф., Низовой А. В. Перспективы использования парогазовых технологий в энергоблоках атомных электростанций // Науч. исслед.: от теории к практике. 2015. № 4 (5). С. 34–38.
3. Щепетина Т. Д. О повышении КПД энергоблоков с водоводяными реакторами (ВВР) // Энергия: экономика, техника, экология. 2010. № 12. С. 21–29.
4. Атомные электростанции с реакторами на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем : в 2 ч. / А. И. Бельтюков [и др.] ; под общ. ред. С. Е. Щеклеина, О. Л. Ташлыкова. Екатеринбург : УрФУ, 2013. Ч. 1. 548 с.
5. САПР United Cycle [Электронный ресурс]. URL: <https://msystema.ru/o-produkte> (дата обращения: 06.12.2020).
6. Студенческая версия САПР United Cycle [Электронный ресурс]. URL: <https://msystema.ru/studentam> (дата обращения: 06.12.2020).