

УДК 621.039

DOI: 10.17223/00213411/64/2-2/171

*И.А. ШИРМАНОВ, В.С. КОСТАРЕВ, Д.Н. ЛИТВИНОВ, С.Е. ЩЕКЛЕИН*

## **О ПРИМЕНЕНИИ КОМПРЕССИИ И НЕЯДЕРНОГО ПЕРЕГРЕВА ПАРА НА РЕАКТОРАХ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ СО СВИНЦОВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЦИКЛА ТУРБОУСТАНОВКИ**

Представлены результаты компьютерного моделирования вариантов тепловых схем АЭС с реактором БРЕСТ-ОД-300 с использованием неядерного перегрева пара, а также паровой компрессии для повышения термодинамической эффективности цикла турбоустановки К-300-240. Проведена оценка эффективности использования данных тепловых схем.

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

### **Введение**

Происходящий в настоящее время переход мировой теплоэнергетики на суперсверхкритические параметры пара позволяет значительно увеличить КПД и снизить расход топлива, а также сократить сбросы вредных веществ в окружающую среду. Для поддержания конкурентоспособности на рынке производителей электроэнергии АЭС необходимо увеличивать свою эффективность. Одним из возможных способов повышения энергоэффективности АЭС с реакторами на быстрых нейтронах является совершенствование термодинамического цикла.

На сегодняшний день атомные и тепловые электрические станции составляют большую часть энергетической системы России – 81.7% по состоянию на 2019 г. [1]. В связи с этим одной из приоритетных задач экономики страны является повышение энергоэффективности при использовании как ТЭС, так и АЭС. В атомной энергетике для достижения данной цели рассматриваются следующие задачи:

- повышение установленной мощности действующих энергоблоков путем модернизации оборудования;
- повышение коэффициентов полезного действия АЭС путем совершенствования тепловых схем и термодинамических циклов;
- увеличение глубины выгорания ядерного топлива;
- повышение коэффициентов использования установленной мощности (КИУМ);
- снижение расходов тепловой и электрической энергии на собственные нужды АЭС;
- снижение непроизводительных расходов и потерь энергии;
- использование низкопотенциальной сбросной тепловой энергии.

Наряду с данными задачами рассматриваются также многочисленные инновационные проекты, способные радикально повысить экологическую, энергетическую и экономическую эффективность атомной энергетике. К таким проектам относятся 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.

### **1. Реактор БРЕСТ-ОД-300**

Реактор БРЕСТ является элементом концепции ядерной энергетики естественной безопасности, разработанной в 1980-х гг. (рис. 1). К принципам, которым должен соответствовать новый вектор развития атомной энергетики, относятся:

- исключение тяжелых аварий АЭС, соответствующих четвертому уровню международной шкалы ядерных событий, что требует эвакуации населения;
- создание замкнутого ядерного топливного цикла для использования в полной мере энергетического потенциала уранового сырья;
- поступательное приближение к радиационно-эквивалентному захоронению природных отходов;

– технологическое усиление нераспространения ядерного оружия (неразделение урана и плутония при переработке облученного ядерного топлива быстрых реакторов, отказ от уранового blankets и обогащения урана);

– конкурентоспособность в сравнении с другими видами производства электроэнергии.

Итогом работы является концептуальный проект реакторной установки естественной безопасности.

Для достижения необходимого спектра нейтронов при низком давлении в первом контуре, а также реализации высоких теплофизических свойств пара был выбран свинцовый теплоноситель. Применение данного теплоносителя, как химически инертного по отношению к рабочему телу, позволило отказаться от второго контура, выполняющего роль промежуточного (трехконтурная схема с промежуточным контуром применяется в реакторах на быстрых нейтронах семейства БН), и использовать двухконтурную схему с интегральной компоновкой. Благодаря большому запасу до кипения теплоносителя при умеренной энергонапряженности активной зоны предложена высокая температура острого пара, что позволяет вывести общий коэффициент полезного действия цикла в диапазон с 44 до 47% [2] при 30–33% у АЭС с реакторами на тепловых нейтронах.

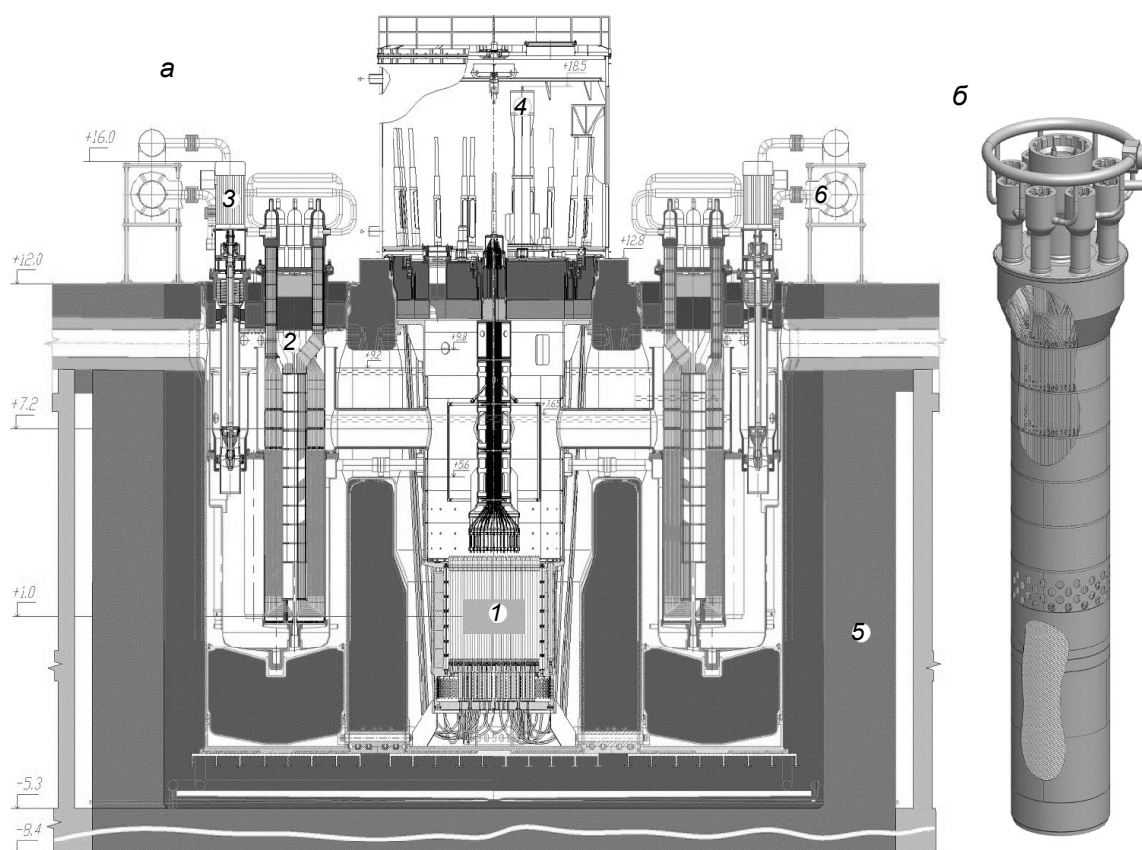


Рис. 1. Реактор БРЕСТ-ОД-300 (а): 1 – активная зона; 2 – парогенератор; 3 – насос; 4 – перегрузочная машина; 5 – шахта реактора; 6 – система расхолаживания. Парогенератор, используемый в реакторе БРЕСТ-ОД-300 (б)

## 2. Система автоматизированного проектирования (САПР) «United Cycle»

САПР «United Cycle» – специализированная программа для автоматизированного проектирования, моделирования и расчета стационарных режимов работы теплоэнергетических установок и систем. Спектр расчетных режимов работы охватывает весь диапазон эксплуатационных нагрузок с учетом отпуска электроэнергии, тепла и пара [3–5].

На кафедре «Атомные станции и возобновляемые источники энергии» УрФУ при помощи данной программы успешно проводились расчеты по определению наиболее термодинамически эффективной модификации тепловой схемы АЭС с реактором ВВЭР-1200. В случае легководных реакторов (ЛВР) становится возможным также понизить параметры первого и второго контура, с последующей компрессией и огневым перегревом пара. Понижение начальных параметров пара

на ЛВР позволит увеличить глубину выгорания ядерного топлива и уменьшить толщину корпуса реактора [6].

### 3. Объект исследования

В настоящее время известно несколько способов повышения энергоэффективности АЭС путем применения перегрева как ядерного, так и неядерного пара.

Повышение КПД цикла АЭС путем применения ядерного перегрева пара успешно применялось на реакторах канального типа АМБ-100 и АМБ-200, но не получило дальнейшего развития, главным образом, из-за необходимости применять для активной зоны реакторов высокотемпературные стали, снижающие эффективность использования уранового топлива [7].

Однако в теплоэнергетике благодаря развитию технологий энергетического машиностроения и созданию высокотемпературных паровых турбин и компрессоров стало возможно широкое применение циклов на суперсверхкритических параметрах пара ( $P = 30$  МПа,  $t = 650$  °С), что позволяет рассматривать возможность достижения суперсверхкритических параметров пара на АЭС с реакторами как на тепловых, так и на быстрых нейтронах [8, 9].

### 4. Постановка задачи

Перед началом моделирования были заданы следующие начальные параметры: температура острого пара принималась равной 530 °С, давление – 26 МПа, расход пара – 890 т/ч. В САПР «United Cycle» затем были построены несколько потенциально возможных вариантов тепловых схем для их дальнейшего расчета. Рассматривались следующие варианты:

- тепловая схема БРЕСТ-ОД-300 со стандартными параметрами;
- тепловая схема БРЕСТ-ОД-300 со стандартными параметрами и начальным огневом перегревом пара (до 650 °С);
- тепловая схема БРЕСТ-ОД-300 с компрессией (до 30 МПа) и одним промежуточным огневом перегревом пара (до 650 °С);
- тепловая схема БРЕСТ-ОД-300 с компрессией (до 30 МПа) и двумя промежуточными огневыми перегревами пара (до 650 °С).

Моделирование производилось без учета и с учетом системы регенеративного подогрева питательной воды (РППВ) в тепловых схемах АЭС.

### 5. Результаты

На рис. 2 и 3 представлены показатели электрической мощности и коэффициента полезного действия АЭС нетто, полученные в результате расчетов без учета и с учетом регенеративного подогрева питательной воды.

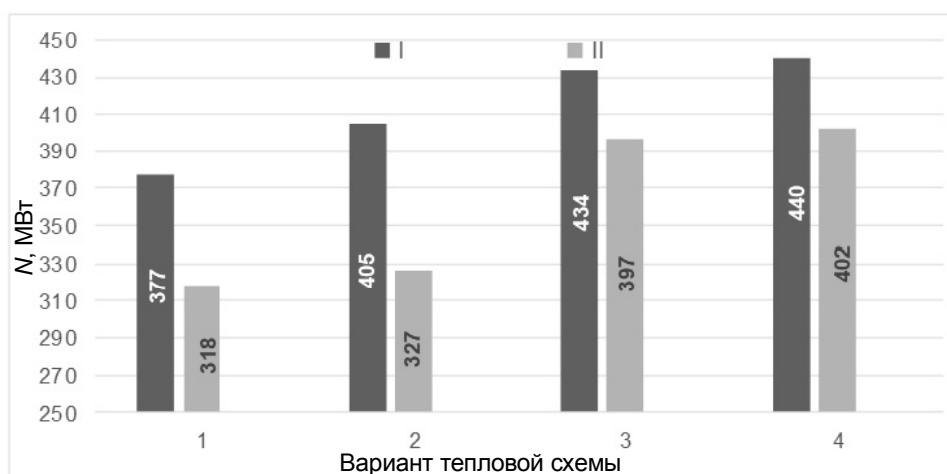


Рис. 2. Электрическая мощность нетто; I – тепловые схемы без включения системы РППВ; II – тепловые схемы с включением РППВ; 1 – тепловая схема БРЕСТ-ОД-300 со стандартными параметрами; 2 – тепловая схема БРЕСТ-ОД-300 со стандартными параметрами и начальным огневом перегревом пара; 3 – тепловая схема БРЕСТ-ОД-300 с компрессией и одним промежуточным огневом перегревом пара; 4 – тепловая схема БРЕСТ-ОД-300 с компрессией и двумя промежуточными огневыми перегревами пара

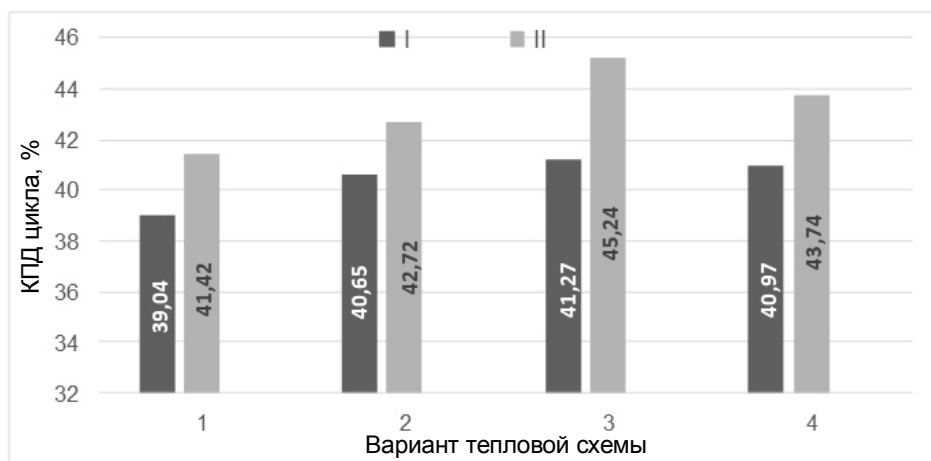


Рис. 3. КПД нетто цикла. Обозначения номеров схем аналогичны рис. 2

Для оценки величины вклада ядерной мощности в общую мощность станции был рассчитан коэффициент использования ядерной энергии  $\xi$  по следующей формуле:

$$\xi = \frac{Q_{\text{ПГ}}}{Q_{\text{ПГ}} + \Sigma Q_{\text{К}}}, \quad (1)$$

где  $Q_{\text{ПГ}}$  – тепловая мощность парогенератора;  $\Sigma Q_{\text{К}}$  – суммарная тепловая мощность паровых котлов, используемых в тепловой схеме. На рис. 4 представлены результаты расчета.

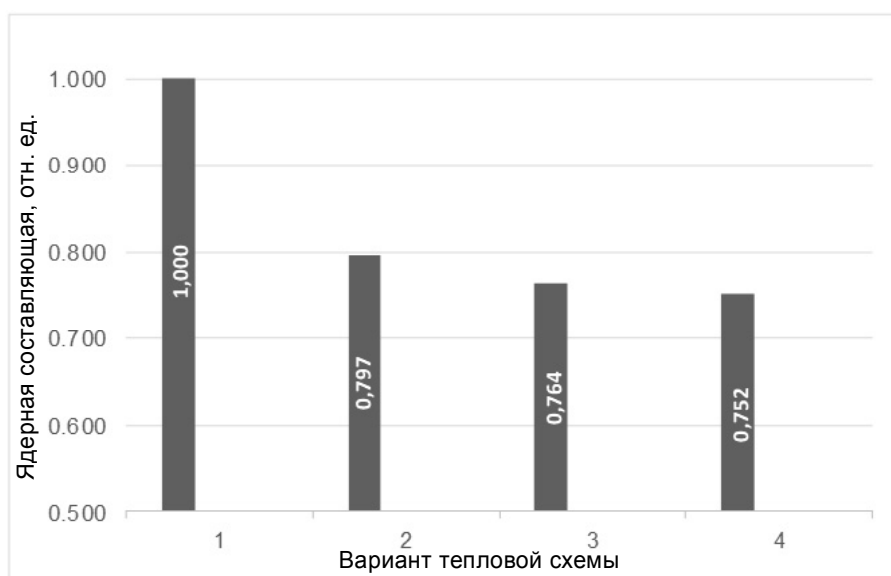


Рис. 4. Коэффициент использования ядерной энергии в цикле. Обозначения номеров схем аналогичны рис. 2

Можно заключить, что коэффициент полезного действия и значение электрической мощности наиболее высоки в схеме 3 (тепловая схема с компрессией и одним огневым перегревом) (рис. 3).

Расширение пара в турбине в каждом из рассматриваемых циклов, за исключением стандартного для работы турбины, проходит в зоне глубокой сверхкритичности, что влияет на термодинамическую эффективность цикла в лучшую сторону. Переход в область влажного пара происходит исключительно на последних ступенях цилиндра низкого давления, что оказывает воздействие на работу конденсатора, куда при обычных режимах не должен попадать перегретый пар.

На рис. 2 и 3 показаны значения электрической мощности и КПД нетто с условием использования системы РППВ в тепловой схеме турбоустановки.

При сопоставлении параметров пара, полученных в результате расчета стандартной тепловой схемы БРЕСТ-ОД-300 в «United Cycle», с проектными на основе системы с турбиной К-300-240

ЛМЗ становится видно, что применение рассмотренных методов повышения параметров пара можно достичь с увеличением КПД станции в целом.

Конечные параметры и параметры пара при отборе для каждой вариации тепловой схемы, за исключением стандартной, подбирались по критерию наиболее высокого коэффициента полезного действия. Наибольшим КПД (45.24%) обладает схема с компрессией и единичным огневым пром-перегревом пара. Наибольшей электрической мощностью (402.43 МВт) располагает схема с компрессией и двумя промперегревами пара. Высокие параметры пара позволяют отказаться от включения в систему РППВ ПВД-8 (после прохождения ПВД-7 пар отправляется сразу в парогенератор), а также снизить давление после прохождения турбины с 0.0034 до 0.0029 МПа с повышением влажности пара с 8.39 до 8.6%. Данный вариант схемы представлен на рис. 5.

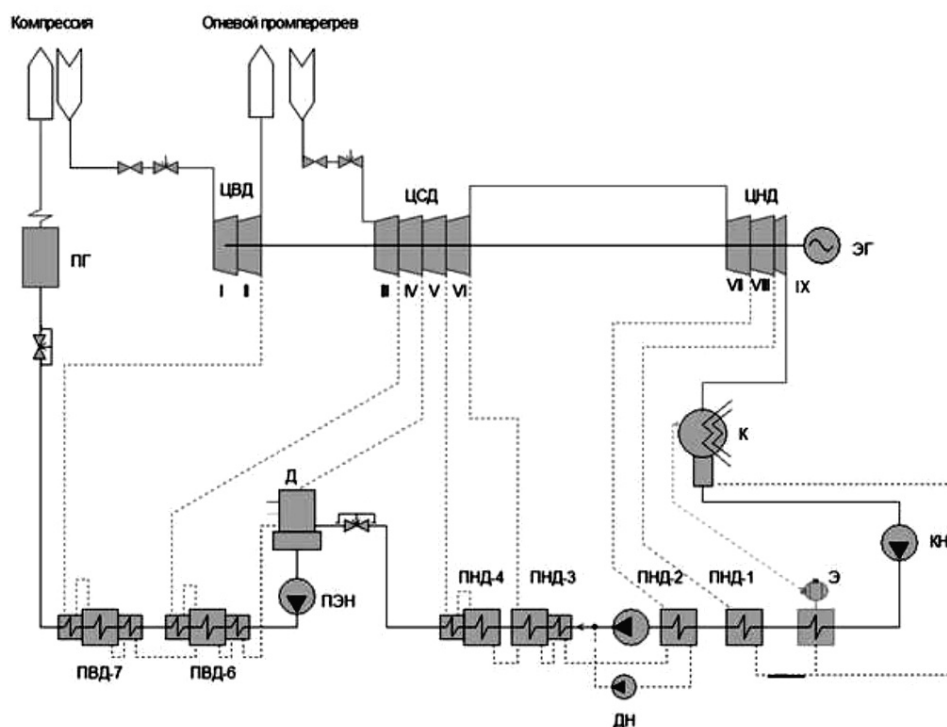


Рис. 5. Тепловая схема с компрессией и одноступенчатым огневым перегревом, созданная в «United Cycle»: I, II – отсеки ЦВД; III, IV, V, VI – отсеки ЦСД; VII, VIII, IX – отсеки ЦНД; Д – деаэрактор; ДН – дренажный насос; К – конденсатор; КН – конденсатный насос; ПВД-6, 7 – подогреватели высокого давления; ПГ – парогенератор; ПНД-1, 2, 3, 4 – подогреватели низкого давления; ПЭН – питательный электронасос; Э – эжектор; ЭГ – электрогенератор

Другие варианты тепловых схем представляют меньший интерес, так как КПД незначительно повышается в сравнении со стандартной схемой. На рис. 6 представлены  $h$ – $S$ -диаграммы процесса расширения пара в турбине для стандартной схемы и для схемы с компрессией и одним промежуточным огневым перегревом пара (таблица). На рис. 6 обозначены следующие характерные точки процесса расширения пара в турбине:

- 1 – параметры пара на выходе из парогенератора;
- 2 – параметры пара на выходе из компрессора (только для схемы А);
- 3<sub>А</sub>, 3<sub>Б</sub> – параметры пара в конце процесса расширения в ЦВД;
- 4<sub>А</sub>, 4<sub>Б</sub> – параметры пара после промежуточного перегрева;
- 5<sub>А</sub>, 5<sub>Б</sub> – параметры пара в конце процесса расширения в ЦНД.

Из данных диаграммы рис. 6 видно, что расширение пара в турбине для схемы с компрессией и промежуточным огневым перегревом находится в области гораздо больших значений энтальпии по сравнению со стандартной схемой, что существенно повышает общую термодинамическую эффективность цикла.

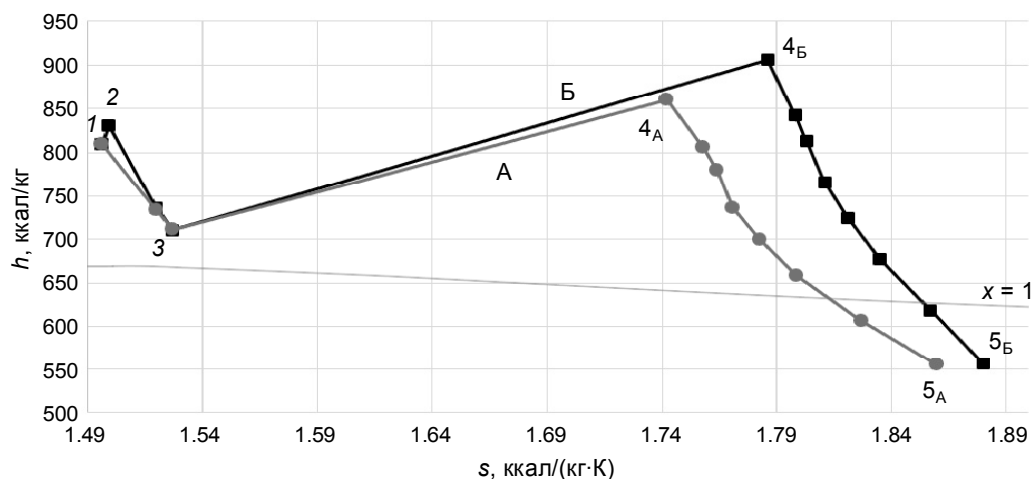


Рис. 6. Диаграмма  $h$ – $S$  процесса расширения пара в турбине: А – тепловая схема с компрессией и промежуточным огневым перегревом; Б – стандартная тепловая схема БРЕСТ-ОД-300. Цифрами обозначены характерные точки процесса расширения

#### Значения термодинамических параметров в характерных точках процесса расширения пара

Номер точки	$P$ , кг/см <sup>2</sup>	$T$ , °C ( $Y$ , %)
Стандартная тепловая схема БРЕСТ-ОД-300		
1	240.0	560.0
3	40.0	303.8
4 <sub>А</sub>	39.74	560.0
5 <sub>А</sub>	0.035	9.12
Тепловая схема с компрессией и промежуточным огневым перегревом		
1	240.0	560.0
2	300.0	607.8
3	40.0	303.8
4 <sub>Б</sub>	43.12	650.0
5 <sub>Б</sub>	0.030	8.65

#### Заключение

Анализ результатов позволяет сделать вывод, что применение в тепловой схеме АЭС с реакторной установкой БРЕСТ-ОД-300 компрессии (до 30 МПа) и последующего промежуточного неядерного (огневого) перегрева пара после ЦВД увеличит электрическую мощность установки на 24.84%, а КПД нетто – на 3.82% по сравнению со стандартным циклом установки, что приводит к значительному повышению термодинамической эффективности цикла.

Применение компрессии и неядерного огневого перегрева пара для выхода параметров пара в область суперсверхкритических параметров на АЭС с реактором БРЕСТ-ОД-300 является целесообразным мероприятием, так как использование данных методов повышения параметров пара позволяет существенно повысить электрическую мощность вырабатываемой АЭС, а также коэффициент полезного действия, что может существенно сказаться на экономической составляющей АЭС.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Отчет о функционировании ЕЭС России в 2019 г. / Акционерное общество «Системный оператор Единой энергетической системы». – 2019.
2. Драгунов Ю.Г., Лемехов В.В., Смирнов В.С., Чернецов Н.Г. // Атомная энергия. – 2012. – Т. 113. – № 1. – С. 58–64.
3. United Cycle. Руководство пользователя.
4. Аникина И.Д., Сергеев В.В., Амосов Н.Т., Лучко М.Г. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2016. – № 2 (243). – С. 24–33.
5. Григорьева Д.В., Шарапа Е.Г. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2016. – № 1 (238). – С. 46–56.

6. Щеклеин С.Е., Титов Г.П., Борисова Е.В. // Вестник Одесского политехнического университета. – 2011. – № 2 (36). – С. 104–108.
7. Петров А.А., Роменков А.А., Ярмоленко О.А. // Изв. вузов. Ядерная энергетика. – 2009. – № 2. – С. 21–29.
8. Касилов В.Ф., Низовой А.В. // Научные исследования: от теории к практике. – 2015. – № 4 (5). – С. 34–38.
9. Darwish M.A., Al Awadhi F.M., and Bin Amer A.O. // Energy. – 2010. – No. 35. – P. 4562–4571.

Поступила в редакцию 20.10.2020.

Уральский федеральный университет им. первого Президента России  
Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

**Ширманов** Иван Андреевич, студент УрФУ, e-mail: topzar76123@gmail.com;  
**Костарев** Вячеслав Сергеевич, студент УрФУ, e-mail: slavakostarev@yandex.ru;  
**Литвинов** Данил Николаевич, студент УрФУ, e-mail: danil.litvinov@urfu.me;  
**Щеклеин** Сергей Евгеньевич, д.т.н., профессор, зав. каф. атомных станций и возобновляемых источников энергии УрФУ, e-mail: s.e.shcheklein@urfu.ru.

*I.A. SHIRMANOV, V.S. KOSTAREV, D.N. LITVINOV, S.E. SHCHEKLEIN*

## ON THE POSSIBILITY OF APPLICATION OF COMPRESSION AND NON-NUCLEAR STEAM SUPERHEATING ON FAST NEUTRON REACTORS WITH A LEAD COOLANT TO INCREASE THE THERMODYNAMIC EFFICIENCY OF THE TURBINE PLANT

The ongoing transition of the world thermal power industry to ultra-supercritical steam parameters makes it possible to significantly increase efficiency and reduce fuel consumption, as well as reduce the discharge of harmful substances into the environment. To maintain competitiveness in the NPP electricity market, it is necessary to increase its efficiency. One of the possible ways to improve the energy efficiency of nuclear power plants with fast reactors is to improve the thermodynamic cycle. The paper presents the results of computer simulation of options for cycle arrangements of NPPs with the BREST-OD-300 reactor using non-nuclear steam superheating, as well as steam compression to increase the thermodynamic efficiency of the cycle of the K-300-240 turbine unit and an assessment of the efficiency of using these cycle arrangements.

**Keywords:** *BREST-OD-300, NPP cycle arrangement, thermodynamic efficiency, ultra-supercritical steam parameters.*

Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

**Shirmanov** Ivan Andreevich, Student UrFU, e-mail: topzar76123@gmail.com;  
**Kostarev** Vyacheslav Sergeevich, Student UrFU, e-mail: slavakostarev@yandex.ru;  
**Litvinov** Danil Nikolaevich, Student UrFU, e-mail: danil.litvinov@urfu.me;  
**Shcheklein** Sergei Evgenievich, Doctor of Technical Sciences, Professor UrFU, e-mail: s.e.shcheklein@urfu.ru.