

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭНЕРГООБЛОКА С ПАРООХЛАЖДАЕМЫМ ЯДЕРНЫМ РЕАКТОРОМ И ГАЗОТУРБИНОЙ НАДСТРОЙКОЙ

А.М. Антонова, А.С. Мережко, А.В. Воробьев

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

E-mail: anton@tpu.ru

EFFICIENCY OF POWER UNIT WITH STEAM-COOLED NUCLEAR REACTOR AND GAS TURBINE TOPPING

A.M. Antonova, A.S. Merezko, A.V. Vorobiev

National Research Tomsk Polytechnic University

Annotation. The paper considers a power unit with a steam-cooled reactor and a gas turbine unit as a source of heat for generating weakly superheated steam - the coolant of a nuclear reactor. The purpose of the research is to determine the efficiency of the power unit and to reveal its dependence on the initial steam pressure.

В странах с развитой атомной энергетикой активно ведутся разработки инновационных быстрых реакторов, охлаждаемых натрием, свинцом или газом, а также водой сверхкритического давления, для работы в замкнутом топливном цикле.

Перейти к быстрому спектру нейтронов, использовать достоинства водного теплоносителя и при этом избежать слишком высоких давлений теплоносителя можно путем использования для охлаждения активной зоны реактора перегретого водяного пара. Для получения слабоперегретого пара, который подается в активную зону, ранее предлагалось несколько способов [1]. В данной работе рассматривается вариант генерации пара за счет теплоты отработавших газов газотурбинной установки (ГТУ) и дальнейший его перегрев в реакторе до высокой температуры.

Исследование проводилось с целью определения эффективности энергоблока с пареохлаждаемым реактором и ГТУ и выявления факторов, от которых она зависит.

Исследуемый энергоблок с быстрым пареохлаждаемым реактором, настроенный ГТУ, может иметь простейшую схему с одноконтурным парогенератором без промежуточного перегрева пара (рис.1). Регенеративный подогрев питательной воды в такой установке не требуется, так как суммарный эффект от регенерации будет отрицательным, что объясняется ростом температуры уходящих газов и снижением КПД парогенератора при повышении температуры питательной воды. Рециркуляция конденсата после экономайзера обеспечивает температуру на входе в ПГ (точка А на схеме) на уровне 60—65 °С, необходимом по условиям работы поверхностей нагрева.

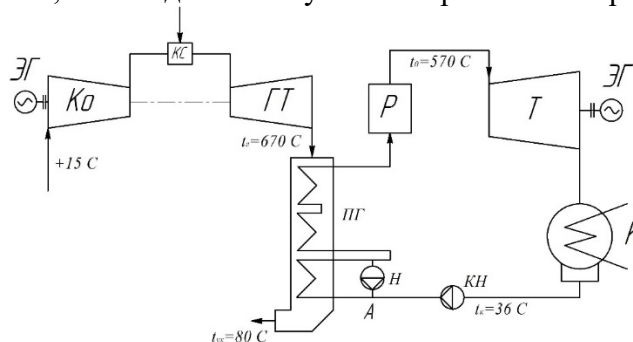


Рис. 1. Принципиальная схема энергоблока с пареохлаждаемым реактором и ГТУ: Р – реактор; Т – паровая турбина; К – конденсатор; КН – конденсатный насос; ПГ – парогенератор; Н – насос рециркуляции; ГТ – газовая турбина; КС – камера сгорания; Ко – компрессор; ЭГ – электрогенератор

Выбор высокотемпературной ГТУ Siemens SGT5–9000HL мощностью 593 МВт обоснован ее высоким КПД (42,8%) [2]. Приняты следующие условия и допущения:

- перегрев пара в парогенераторе 30°C ; температура пара перед входом в турбину равна 570°C ; начальное давление пара в базовом варианте принято 4 МПа; давление в конденсаторе равно 6 кПа; допустимая влажность пара в турбине $\leq 11\%$;

- для исключения конденсации водяных паров из газов на хвостовых поверхностях нагрева принята температура уходящих газов 80°C .

Расчеты проведены на модели, основанной на балансовом методе. Анализ результатов говорит о том, что тепловая эффективность рассматриваемого энергоблока значительно превышает показатели существующих атомных станций: КПД энергоблока составил 55,7%, что в 1,7 раза выше КПД энергоблоков с ВВЭР.

С целью исследования влияния начального давления пара на экономичность энергоблока проведены варианты расчеты тепловой схемы энергоблока при различных значениях начального давления пара, которое варьировалось в диапазоне 4...15 МПа. Результаты расчетов представлены на рис.2. С ростом давления пара КПД паротурбинной установки (ПТУ) изменяется от 38,6 до 42,9 %, т.е. относительный прирост КПД ПТУ составляет 11 %. Несмотря на столь существенный прирост КПД ПТУ, КПД энергоблока меняется в диапазоне 0,557...0,579, прирост составляет 3,9 % (отн.). Расход генерируемого пара в этом диапазоне меняется еще меньше: от 242,6 до 248,1 кг/с (прирост 2,3 %), мощность энергоблока – в диапазоне 869...899 МВт (прирост 3,5 %). Тепловая мощность реактора снижается на 3,8 %.

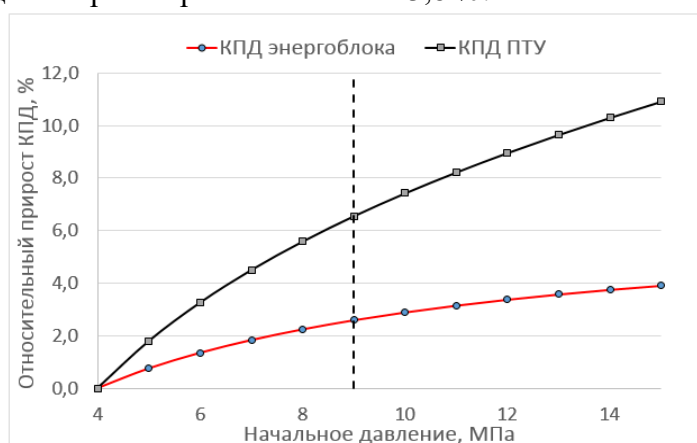


Рис. 2. Расчетные зависимости относительного прироста КПД: пунктирная линия – граница диапазона p_0 по условию допустимой влажности

Анализ показывает, что, в то время как в рассматриваемом диапазоне начальное давление пара увеличивается в 3,75 раза, колебания основных показателей энергоблока не превышают 2...4 %, что можно отнести к малым изменениям. Кроме того, основной рост КПД и мощности энергоблока имеет место в интервале значений начального давления от 4 до 8 МПа, затем рост КПД и мощности энергоблока замедляется.

Отсюда следует важнейший вывод: обеспечить очень высокий КПД энергоблока с пароохлаждаемым ядерным реактором и ГТУ можно, не повышая начальное давление пара, что позитивно скажется на безопасности реактора и энергоблока и инвестициях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Просвирнов А.А., Нафталъ М.М. Концепция быстрого парового реактора малой мощности [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://seplm.ru> (дата обращения: 04.05.2020).
2. Газовая турбина SGT5-9000HL [Электронный ресурс]. – Режим доступа <https://new.siemens.com/ru/ru/produkty/energetika/proizvodstvo-energii/gazovie-turbiny/sgt-9000hl.html> (дата обращения: 18.03.2020).