

УДК 621.165

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ТУРБОУСТАНОВОК АЭС С РЕАКТОРАМИ ВВЭР И БН К ОТКЛОНЕНИЮ НАЧАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПАРА

Ямалов Б.Р., студент гр. А-1-23, III курс

Научный руководитель: Базин Д.А., ассистент

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань

На современных атомных электростанциях России эксплуатируются реакторы двух принципиально различных типов – ВВЭР (тепловые нейтроны) и БН (быстрые нейтроны). Различия в физике реакторов и схемах теплоотвода обуславливают существенно разные параметры пара, вырабатываемого в парогенераторах вторичного контура. В реакторных установках типа ВВЭР реализована двухконтурная схема, в которой тепло от активной зоны передается воде второго контура в парогенераторах типа ПГВ-1000. В реакторах типа БН используется трехконтурная схема с натриевым теплоносителем, где тепло от реактора через промежуточный контур передается воде в парогенераторах типа ПГН-200М. ПГВ-1000 генерирует насыщенный пар средних параметров с давлением 6,27 МПа и температурой 278°C [1], тогда как ПГН-200М – перегретый пар высоких параметров с давлением 13,7 МПа и температурой 505°C [2]. Современные требования к надежности и экономичности работы атомных электростанций обуславливают необходимость детального анализа влияния отклонений режимных параметров на энергетические показатели оборудования. В процессе эксплуатации неизбежны отклонения параметров пара от номинальных значений, вызванные изменением мощности реактора, выгоранием топлива, работой систем регулирования и техническим состоянием оборудования. Поддержание оптимальных параметров пара является важнейшей задачей эксплуатационного персонала, поскольку даже незначительные отклонения могут приводить к ощутимым потерям электроэнергии и снижению экономичности энергоблоков. Однако до настоящего времени отсутствуют систематические сравнительные исследования, показывающие, какой тип турбоустановок более критичен к таким отклонениям, что затрудняет разработку дифференцированных требований к точности поддержания режимов для разных типов реакторов. Целью настоящей работы является количественная оценка и сравнение влияния изменения давления свежего пара на электрическую экономичность турбоустановок АЭС с реакторами ВВЭР-1000 и БН-600.

Для решения поставленной задачи использован метод малых отклонений, широко применяемый в инженерных расчетах турбоустановок для оценки влияния изменения параметров на эффективность тепломеханического оборудования. В рамках метода малых отклонений предполагается линейная зависимость изменения энергетических показателей турбоустановки от

относительного отклонения давления свежего пара. Такой подход является приближенным, однако широко применяется в инженерных расчетах при анализе режимов работы оборудования вблизи номинальных условий. Физически снижение давления свежего пара приводит к уменьшению располагаемого теплосоперпада в проточной части турбины, что вызывает снижение вырабатываемой мощности и, соответственно, годовой выработки электроэнергии. При этом характер влияния давления определяется конструктивными особенностями турбины и параметрами рабочего тела.

Исходные данные для расчетов приняты на основе паспортных характеристик турбин К-1000-60/1500 (ВВЭР-1000) и К-800-130/3000 (БН-600) и представлены в таблице 1. Коэффициенты чувствительности выработки электроэнергии к изменению давления свежего пара заданы в рамках метода малых отклонений и приняты как параметры модели. В литературе отсутствуют нормированные значения данных коэффициентов для конкретных турбоустановок, однако известно, что изменение начальных параметров пара приводит к изменению КПД и мощности турбин. В связи с этим в работе приняты значения коэффициентов чувствительности 0,25 для ВВЭР-1000 и 0,35 для БН-600, соответствующие верхней границе характерного диапазона, используемого в инженерных оценках, что позволяет оценить наихудший случай влияния отклонений давления. Значения КИУМ (Коэффициент использования установленной мощности) приняты на основе эксплуатационных данных: для ВВЭР-1000 – 0,86 [3], для БН-600 – 0,75.

Таблица 1

Номинальные параметры турбоустановок и коэффициенты чувствительности

Параметр	Обозначение	Ед. изм.	ВВЭР-1000	БН-600
Мощность турбины	N	МВт	1000	600
Давление свежего пара	P ₀	Мпа	6,3	13,7
Коэффициент использования установленной мощности	КИУМ	о.е.	0,86	0,75
Годовая выработка	W	млн кВт·ч	7534	3942
Коэф. чувствительности к давлению	k	%/%	0,25	0,35

Годовая выработка рассчитана по формуле $W = N \cdot 8760 \cdot \text{КИУМ} / 1000$. Расчет влияния отклонений выполняется по формуле: $\Delta\eta = k \cdot (\Delta P / P_0) \cdot 100\%$, $\Delta W = W \cdot (\Delta\eta / 100)$ – для недовыработки. Диапазон рассматриваемых отклонений давления составляет от -3% до -10%.

Результаты расчетов влияния отклонений давления на эффективность турбоустановок представлены в таблице 2.

Таблица 2

Потери при отклонении давления

Отклонение	ВВЭР-1000	ВВЭР-1000	БН-600	БН-600
	$\Delta\eta$, %	ΔW , млн кВт·ч	$\Delta\eta$, %	ΔW , млн кВт·ч
-3%	0,75	56,5	1,05	41,4
-5%	1,25	94,2	1,75	69,0
-10%	2,50	188,4	3,50	138,0

Анализ полученных результатов показывает, что при снижении давления на 5% потери выработки турбоустановки БН-600 составляют 1,75%, что превышает потери ВВЭР-1000 (1,25%). При увеличении глубины снижения давления до 10% данное соотношение сохраняется. В абсолютном выражении недо-выработка электроэнергии для ВВЭР-1000 выше вследствие большей установленной мощности, несмотря на меньшую относительную чувствительность.

Проведенное исследование показало, что отклонение давления свежего пара оказывает заметное влияние на выработку электроэнергии турбоустановок АЭС. При этом для турбоустановки БН-600 в рамках принятой модели наблюдается более высокая относительная чувствительность к изменению давления по сравнению с установкой ВВЭР-1000. В то же время в абсолютном выражении потери электроэнергии для ВВЭР-1000 оказываются более значительными, что обусловлено большей установленной мощностью энергоблока.

Следует отметить, что полученные результаты носят оценочный характер, поскольку коэффициенты чувствительности заданы в рамках метода малых отклонений и приняты в виде параметров модели. В связи с этим представленные зависимости отражают общий характер влияния давления свежего пара на энергетические показатели турбоустановок и могут рассматриваться как приближенная инженерная оценка. Полученные результаты могут быть использованы при анализе эксплуатационных режимов, оценке потерь электроэнергии при отклонении параметров и обосновании требований к точности поддержания давления свежего пара в турбоустановках различных типов.

Список литературы

1. Машиностроение ядерной техники. В 2 кн. Кн. 1. Раздел IV. Расчет и конструирование машин. Том IV-25 / под ред. Е. О. Адамова ; ред.-сост. В. И. Солонин ; отв. ред. К. С. Колесников. — М. : Машиностроение, 2005. — Разд. 3. Оборудование систем реакторных установок.
2. Реактор БН-600 [Электронный ресурс] // Библиоатом. — URL: <https://www.biblioatom.ru/core-systems/nuclear-reactors/bn-600/> (дата обращения: 07.03.2026).
3. На Ростовской АЭС установлен новый рекорд выработки электроэнергии [Электронный ресурс] // РИА Новости. — 2013. — URL: <https://ria.ru/20130111/917705997.html> (дата обращения: 09.03.2026).
4. 30-летний опыт промышленной эксплуатации реактора БН-600 [Электронный ресурс] // Атомная энергия 2.0. — 2015. — URL: <https://www.atomic-energy.ru/articles/2015/05/06/12429> (дата обращения: 10.03.2026).