

*Костарев В. С., Ширманов И. А., Литвинов Д. Н., Щеклеин С. Е.*

## **ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ОПТИМАЛЬНЫХ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РЕАКТОРА ВВЭР-1200 ПРИ ПОМОЩИ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

*Аннотация.* На сегодняшний день атомные и тепловые электрические станции составляют наибольшую часть энергетической системы России (около 67%). Основная часть действующих в мире АЭС используют реакторы на тепловых нейтронах, которые обеспечивают относительно низкие начальные параметры водяного пара для паротурбинных установок, которые влекут за собой небольшие значения термического КПД (30-35%). Самым распространенным в атомной энергетике типом реактора является реактор с водой под давлением (ВВЭР или PWR). Для решения задачи нахождения оптимальных термодинамических параметров пара в реакторах ВВЭР было проведено моделирование различных вариантов тепловых схем ВВЭР-1200 при различных параметрах пара при помощи САПР United Cycle с целью нахождения зависимости значения КПД от термодинамических параметров. Рассматривались различные термодинамические параметры пара с целью получения наибольшего значения КПД нетто в заданном диапазоне допустимых параметров и построения графика зависимости КПД нетто от давления в парогенераторе ЯЭУ.

*Ключевые слова:* ВВЭР-1200, тепловая схема АЭС, компьютерное моделирование, оптимизация термодинамических параметров пара.

*Abstract.* Today, nuclear and thermal power plants make up the largest part of the Russian energy system (about 67%). The majority of nuclear power plants operating in the world use thermal neutron reactors, which provide relatively low initial parameters of steam for steam turbine plants, which entail low thermal efficiency values (30-35%). The most common type of reactor in nuclear power engineering is a pressurized water reactor (VVER or PWR). To solve the problem of finding the optimal thermodynamic parameters of steam in VVER reactors, various variants of VVER-1200 thermal schemes for various steam parameters using United Cycle CAD system were simulated in order to find the dependence of the efficiency value on thermodynamic parameters. Various thermodynamic parameters of steam were considered in order to obtain the highest value of the net efficiency in a given range of permissible parameters and to plot the dependence of the net efficiency on the pressure in the steam generator of the nuclear power plant.

*Keywords:* VVER-1200, NPP steam-cycle arrangement, computer simulation, optimization of thermodynamic parameters of steam.

### **Введение**

Повышение энергоэффективности экономики страны является одной из приоритетных задач. Для достижения этой цели в атомной энергетике рассматривают следующие пути:

- увеличение глубины выгорания ядерного топлива;

- повышение установленной мощности действующих энергоблоков путем модернизации оборудования;
- повышение коэффициентов полезного действия АЭС путем совершенствования тепловых схем и термодинамических циклов;
- 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, решаемыми эволюционным путем, рассматриваются многочисленные инновационные проекты, способные радикально повысить экологическую, энергетическую и экономическую эффективность атомной энергетики.

Технологический цикл АЭС с реакторами на тепловых нейтронах с водным теплоносителем (ЛВР) обладает следующими особенностями [1]:

- выбор современного давления в первом контуре реакторов ЛВР большой мощности (15,7 МПа) связан с ограничением по температуре, равным 350°C для оболочек ТВЭЛов из циркониевых сплавов. Отсюда следует, что предельная температура пара во втором контуре не может превысить 315°C в случае его перегрева. Таким образом, выбор циркониевого сплава для оболочек ТВЭЛов и повышение единичной мощности блоков практически предопределили термодинамические параметры АС с ЛВР: давление первого контура около 16 МПа, температура теплоносителя на выходе из реактора 320 – 330°C; давление и температура пара во втором контуре соответственно 6,3-7,2 МПа и 279-285°C.
- высокая мощность турбоустановок достигается большими расходами пара, что влияет на потери тепловой энергии в конденсаторе паровой турбины. Повышенные невосполнимые тепловые потери в холодном источнике снижают экономичность работы таких энергоблоков, поэтому КПД брутто современных атомных электростанций, как правило, не превышает 32-35 %.

Известно, что максимальная термодинамическая эффективность паросиловых циклов достигается при одновременном повышении начальной температуры и начального давления пара.

В данной работе предложен вариант решения задачи нахождения оптимальных термодинамических параметров пара в реакторах ВВЭР-1200 при помощи компьютерного моделирования тепловой схемы турбоустановки в САПР

United Cycle. В ходе моделирования были построены различные варианты тепловых схем ВВЭР-1200 при различных параметрах пара с целью нахождения зависимости значения КПД от термодинамических параметров. Рассматривались различные термодинамические параметры пара с целью получения наибольшего значения КПД в заданном диапазоне допустимых параметров и построения графика зависимости КПД от давления в парогенераторе.

### **Математическое моделирование тепловых схем АЭС**

При разработке, проектировании и создании сложных объектов (ТЭС и АЭС) требуются знания о количественных и качественных закономерностях, свойственных рассматриваемым системам; эти сведения могут быть получены на базе метода математического моделирования.

Согласно основным положениям моделирования энергоустановок ТЭС и АЭС, математическая модель дает формализованное и приближенное (с определенной степенью точности) описание реальной картины количественных и логических взаимосвязей и соотношений между основными параметрами рассматриваемого объекта, технологическими и материальными характеристиками его элементов, характеристиками внешних технологических и экономических связей, системой ограничений и соответствующим критерием эффективности [2].

Для создания математической модели тепловой и атомной энергетических установок моделируемый объект выделяется как характерное генерирующее звено энергосистемы. Внешние технологические и экономические связи заменяются их обобщенным описанием или количественными характеристиками. При этом сама энергоустановка рассматривается как единый сложный комплекс разнородных элементов оборудования и сооружений, предназначенный для выработки электроэнергии, теплоты, вторичного ядерного топлива путем одновременного, непрерывного осуществления различных взаимосвязанных процессов реального цикла. Всякое изменение любого параметра или элемента энергоустановки в той или иной степени влияет на параметры, характеристики и показатели всего комплекса.

Конечной целью математического моделирования и комплексной оптимизации АЭС является выбор оптимального вида технологической схемы и значений ее параметров, конструктивно-компоновочных решений по оборудованию.

Для адекватного описания состояния энергоустановки необходимо знать параметры рабочего тела во всех точках тепловой схемы. Технологически потоки рабочего тела связывают между собой конкретные элементы оборудования. В

зависимости от типа и назначения установки она может включать в себя те или иные типы оборудования. По функциональному назначению все оборудование может быть разбито на следующие группы:

- турбина, которая включает в себя отсеки расширения, смесители пара и камеры отбора;
- арматура: задвижки, стопорные и регулирующие клапаны;
- насосы;
- теплообменные аппараты: охладители пара и дренажа, подогреватели различных типов, конденсаторы, деаэраторы и т. п.,
- прочие элементы.

Вне зависимости от места в тепловой схеме функциональное назначение и агрегатное состояние рабочего тела, участвующего в процессах внутри элемента оборудования, остается одним и тем же. Например, в подогревателе поверхностного типа происходит теплообмен между паром и водой в процессе конденсации пара. В условиях статического равновесия этот процесс упрощенно может быть описан следующим образом.

Расход воды на входе в подогреватель равен расходу его из подогревателя, расход греющего пара в подогреватель равен расходу дренажа из подогревателя, количество теплоты, приобретенной водой, равно разности теплосодержания греющего пара и дренажа. При таком описании неважно, понимаем ли мы в качестве воды основной конденсат, питательную или сетевую воду, т. е. играет ли подогреватель роль ПНД, ПВД или ПСГ. Кроме того, тот же подогреватель поверхностного типа может содержать охладители дренажа и пара. Функциональное назначение последних и их математическое описание не зависят от того, встроен ли охладитель в подогреватель или расположен отдельно как самостоятельная технологическая единица.

Проведя аналогичный анализ для всех других элементов оборудования энергоустановок различного типа, можно установить минимальный по составу перечень элементов, для которых необходимо построить математические модели, чтобы полностью описать всю установку в целом. На содержание перечня оказывает, правда, влияние алгоритм решения системы уравнений, описывающей всю установку в целом.

Пакет United Cycle предназначен для решения задач определения наилучших структуры и состава оборудования теплоэнергетического объекта и расчета стационарных эксплуатационных режимов работы. Пакет предназначен для инженеров-теплоэнергетиков, специализирующихся на расчетах тепловых схем энергоустановок [3].

Пакет United Cycle строится на алгоритме, в котором решение системы нелинейных уравнений ищется в едином итерационном процессе без разбиения исходного графа на подграфы. Этот алгоритм учитывает специфику изменения параметров в графе, соответствующем технологическому процессу, и обеспечивает решение системы уравнений во всем диапазоне эксплуатационных нагрузок не только отдельного энергоблока, но и всей электростанции в целом.

Пакет United Cycle отличается:

- высокая степень детализации тепловой схемы моделируемого объекта,
- выверенные и отлаженные в течение многолетней эксплуатации модели элементов оборудования
- высокая точность сведения материального и теплового баланса
- многоуровневая система тестирования на каждом шаге создания модели, расчета и анализа результатов режимов работы
- высокоразвитая графическая среда разработки и визуализации результатов.

В рамках пакета United Cycle (UC) создание модели энергоустановки превращается в триединую задачу, требующую квалификации инженера-теплоэнергетика, определенных дизайнерских навыков и аккуратности. Во-первых, необходимо из стандартных изображений элементов оборудования набрать тепловую схему моделируемого объекта. Эта схема полностью определит структуру уравнений математической модели. Во-вторых, чтобы перейти к реальной энергоустановке, необходимо каким-то образом задать численные значения коэффициентов уравнений математической модели. И, в-третьих, для графического представления результатов расчетов режимов работ необходимо построить выходную форму – упрощенное изображение части или всей тепловой схемы, на которое в определенные места будут выводиться результаты расчетов. И только после этого можно переходить непосредственно к расчетам.

### **Постановка задачи**

На рис. 1 представлена тепловая схема, построенная в United Cycle для дальнейших расчетов.

Для расчета в САПР United Cycle была построена тепловая схема ЯЭУ ВВЭР-1200, для которой в дальнейшем задавались начальные параметры. В таблице 1 приведены начальные параметры каждой из рассчитываемых схем.

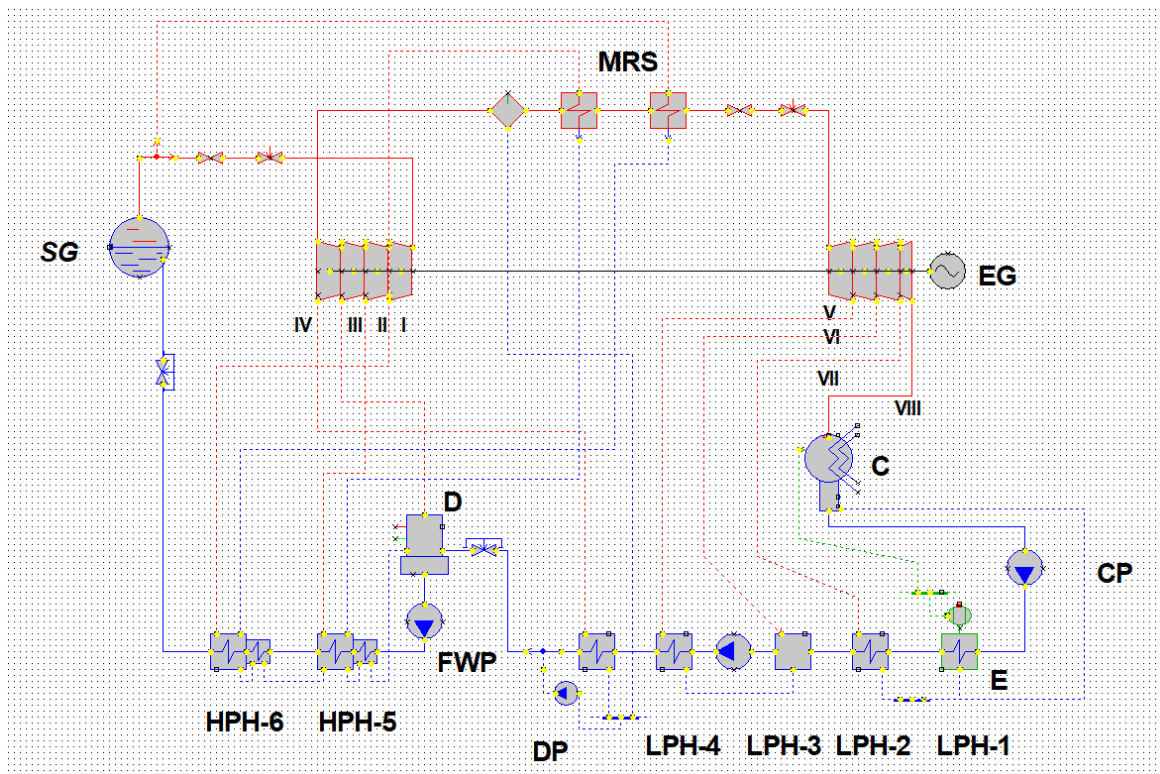


Рисунок 1 – Тепловая схема ВВЭР-1200, созданная в United Cycle: I, II, III, IV, V, VI, VII, VIII – отсеки турбины; D – деаэратор; DP – дренажный насос; C – конденсатор; CP – конденсатный насос; SG – парогенератор; LPH-1, 2, 3, 4 – подогреватели низкого давления, HPH-5, 6 – подогреватели высокого давления, FWP – питательный электронасос, E – эжектор; EG – электрогенератор

Таблица 1 – Начальные параметры рассчитываемых вариантов тепловых схем

№ схемы п/п	P, МПа	T, °C
1	6,0	275,59
2	6,5	280,86
3 (стандартная схема)	6,79	283,78
4	7,0	285,83
5	7,5	290,54
6	7,8	293,25

Расход пара во всех случаях принимался равным стандартному расходу пара в тепловой схеме ВВЭР-1200 – 6495,9 т/ч.

## Результаты

По результатам расчетов в United Cycle были определены КПД нетто и электрические мощности каждого из вариантов схем, а также построена кривая зависимости КПД от начального давления.

Значения КПД нетто и электрических мощностей приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Значения КПД нетто и электрических мощностей рассчитанных вариантов тепловых схем

№ схемы п/п	КПД нетто	N <sub>э</sub> , МВт
1	0,301	1090
2	0,330	1112
3	0,350	1136
4	0,353	1154
5	0,357	1172
6	0,355	1186

На рис. 2 представлена кривая зависимости КПД нетто от давления пара в парогенераторе.

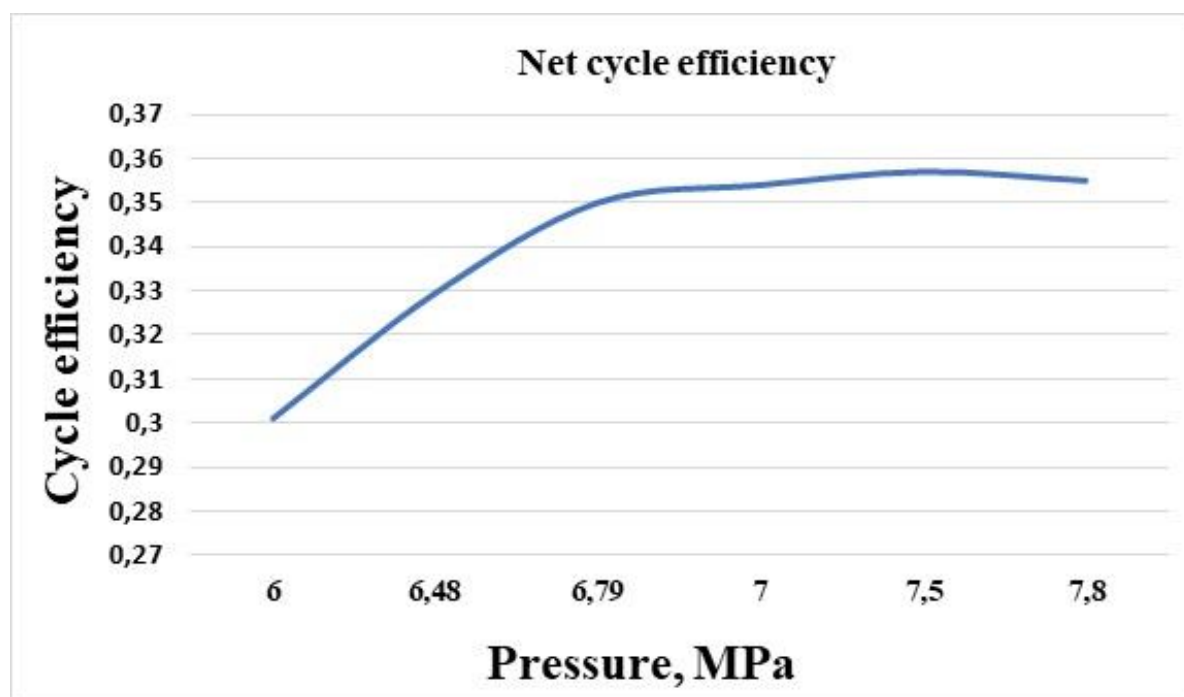


Рисунок 2 – Кривая зависимости КПД нетто от давления пара в парогенераторе

Для варианта схемы с наибольшим значением КПД (P=7,5 МПа) в United Cycle также была построена h-s диаграмма процесса расширения пара в турбине (рис. 3).

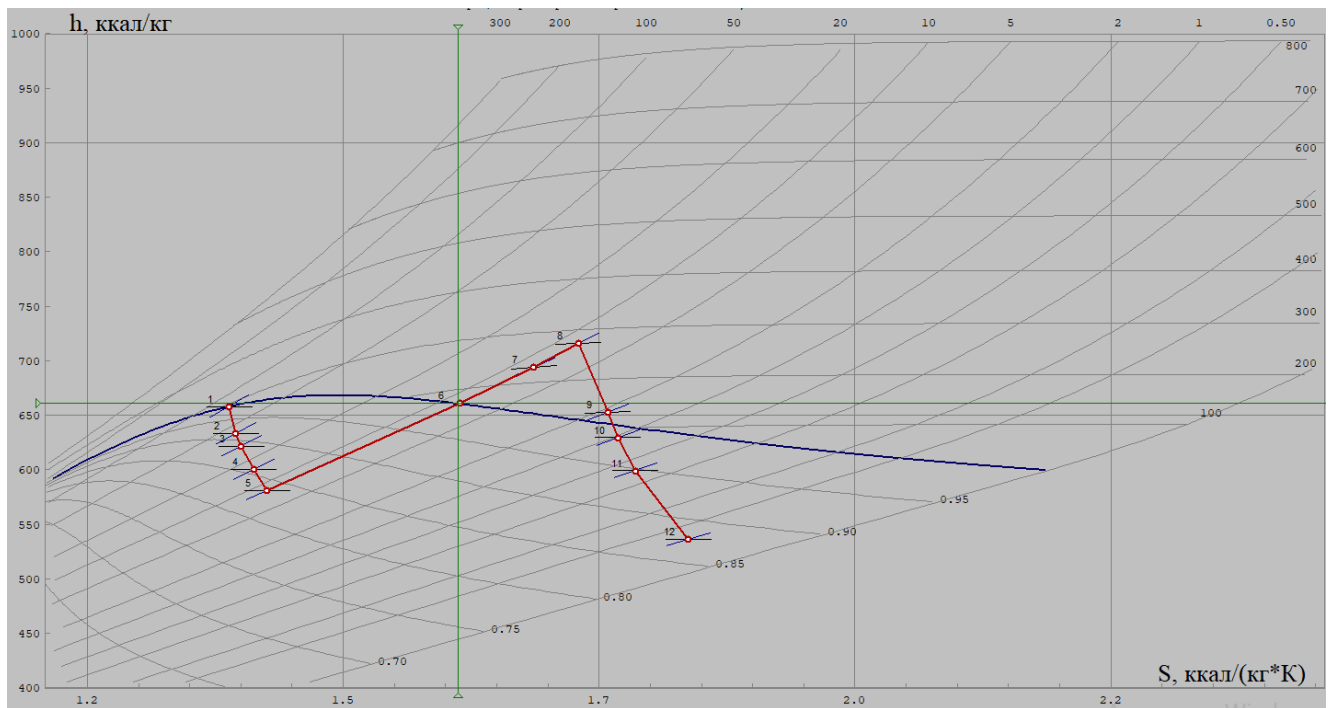


Рисунок 3 – h-s диаграмма расширения пара в турбине при давлении 7,5 МПа

Из графика видно, что с увеличением давления пара в парогенераторе начинает расти и КПД, однако этот рост при больших значениях давления начинает замедляться и достигает максимума в районе 7,5 МПа, после чего начинает падать. Таким образом, можно сделать вывод, что повышение начальных параметров пара в ВВЭР-1200 целесообразно только до области, находящейся в районе 7.5 МПа, поскольку дальнейшее увеличение давления приведет лишь к падению КПД.

h-s диаграмма же достаточно схожа с h-s диаграммой стандартного цикла ВВЭР-1200, за исключением того, что расширение пара происходит при несколько более высоких параметрах.

### Заключение

Результаты моделирования показали, что оптимальным вариантом начальных параметров ВВЭР-1200, при котором обеспечивается наивысший КПД, из числа рассматриваемых в данной работе, является комбинация давления  $P=7,5$  МПа и температуры  $T=290,54$  °С, что обеспечивает значение КПД нетто 0,357 и электрическую мощность установки 1172 МВт.

Дальнейшее повышение давления является нецелесообразным, поскольку при таких значениях начальных параметров КПД начинает падать.

Определение оптимальных начальных параметров позволяет повысить электрическую мощность, вырабатываемую АЭС, и коэффициент полезного действия. Дальнейшее совершенствование термодинамического цикла



легководных АЭС является весьма эффективным с экономической и термодинамических точек зрения.

### ***Библиографический список***

1. Щеклеин С. Е. Повышение энергоэффективности АЭС / С. Е. Щеклеин, О. Л. Ташлыков, А. М. Дубинин // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2015. – № 4. – С. 15–25.
2. Тепловые схемы ТЭС и АЭС / В. М. Боровков, О. И. Демидов, С. А. Казаров [и др.] ; под ред. С. А. Казарова. – Санкт-Петербург : Энергоатомиздат, 1995. – 392 с. – ISBN 5-283-04708-3.
3. United Cycle. Руководство пользователя. – URL: [nil-teplo.ru/unitedcycle/](http://nil-teplo.ru/unitedcycle/) (дата обращения: 17.03.2021).
4. Калафти Д. Д. Термодинамические циклы атомных электростанций / Д. Д. Калафати. – Москва ; Ленинград : Госэнергоиздат, 1963. – 280 с.
5. Щепетина Т. Д. О повышении КПД энергоблоков с водо водяными реакторами (ВВР) / Т. Д. Щепетина // Энергия: экономика, техника, экология. – 2010 – № 12 – С. 21–29.
6. A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems. Issued by the US DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee and the Generation IV International Forum, December 2002 // GEN IV International Forum. – 2021. – URL: [https://www.gen-4.org/gif/jcms/c\\_40473/a-technology-roadmap-for-generation-iv-nuclear-energy-systems](https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_40473/a-technology-roadmap-for-generation-iv-nuclear-energy-systems) (accessed: 17.03.2021).