

Министерство образования и науки Российской Федерации  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования



**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Направление подготовки/профиль 13.06.01 – Электро- и теплотехника / 05.14.14 – Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты

Школа Инженерная школа энергетики

Отделение НОЦ И.Н. Бутакова

**Научный доклад об основных результатах подготовленной  
научно-квалификационной работы**

Тема научного доклада
Разработка и исследование схем парогазовых установок на основе трех рабочих тел УДК 621.18:621.138-027.236:628.477

Аспирант

Группа	ФИО	Подпись	Дата
A4-46	Цибульский Святослав Анатольевич		

Руководителя профиля подготовки

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
И.о. руководителя ИШЭ	Матвеев Александр Сергеевич	Кандидат технических наук		

Руководитель отделения

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель НОЦ И.Н. Бутакова	Заворин Александр Сергеевич	Профессор, Доктор технических наук		

Научный руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент НОЦ И.Н. Бутакова	Галашов Николай Никитович	Кандидат технических наук		

Основными путями совершенствования электроэнергетических установок служат увеличение эффективности выработки электроэнергии, повышение маневренности и срока службы, снижение нагрузки на окружающую среду.

Увеличение температуры подвода и понижение температуры отвода тепла в цикле служат главными стимулами для повышения КПД.

Температура подвода тепла определяется конструкционными материалами, из которых изготавливаются паропроводы, рабочие и сопловые лопатки, и т.д., а также способами охлаждения наиболее нагретых элементов. Так, для паротурбинных установок (ПТУ), после совершенствования конструкционных материалов, температура подвода пара к паровой турбине выросла с 400 °С до 600 °С, а для газотурбинных установок (ГТУ) выросла с 700 °С до 1600 °С, что позволило повысить КПД ПТУ с 24 % до 45 %, а КПД ГТУ с 20 % до 44 %.

Понижение температуры отвода тепла в цикле влияет на КПД установки сильнее, чем повышение начальной температуры подвода в цикле. Однако в газотурбинной установке температура отвода тепла ограничена процессами, протекающими в газовой турбине, в паротурбинной установке ограничена температурой среды, в которой отводится тепло, а также типом конденсатора. Так, например, в паротурбинной установке, работающей на водяном паре при охлаждении в конденсаторе циркуляционной водой, температуру отвода в цикле невозможно достичь ниже +15 °С. В тоже время температуру отвода можно понизить ниже +15 °С, если охлаждать водяной пар воздухом, но это снизит надежность установки. Решить данную проблему возможно применением в цикле низкокипящего рабочего вещества (НКВ) и конденсация его в воздушном конденсаторе (ВК). Данное решение позволит надежно и безопасно отводить тепло при отрицательных температурах окружающего воздуха, тем самым понизив температуру отвода тепла в цикле в зимнее время года ниже 0 °С.

Для крупных энергогенерирующих установок наибольшие значения КПД на данный момент достигнуты парогазовыми установками утилизационного типа. В данной установке объединены два рассмотренных выше цикла – цикл газотурбинной установки, в котором рабочим телом являются продукты сгорания ископаемого топлива, и цикл паротурбинной установки, в котором рабочим телом является вода и водяной пар. Передача тепла от верхнего термонагруженного цикла ГТУ к ПТУ осуществляется в теплообменнике противоточного типа – котле-утилизаторе (КУ). В КУ тепло от отработанных в газовой турбине газов передается воде и водяному пару.

Уравнение для определения КПД ПТУ утилизационного типа:

$$\eta_{\text{ПГУ\_УТ}} = \eta_{\text{ГТУ}} + (1 - \eta_{\text{ГТУ}}) \eta_{\text{к-у}} \eta_{\text{ПТУ}},$$

где:  $\eta_{\text{ПГУ\_УТ}}$  – термический КПД парогазовой установки утилизационного типа;  $\eta_{\text{ГТУ}}$  – термический КПД газотурбинной установки;  $\eta_{\text{к-у}}$  – теоретический КПД котла-утилизатора;  $\eta_{\text{ПТУ}}$  – КПД паротурбинной установки.

Из приведенного уравнения вытекает, что для увеличения КПД комбинированного цикла парогазовой установки необходимо добиваться повышения КПД отдельных циклов, а также котла-утилизатора. КПД котла-утилизатора и паротурбинной установки находятся в сильной зависимости от температуры газов на выходе из ГТУ, кроме того мощность ГТУ составляет около 2/3 от всей мощности ПГУ.

Увеличение КПД газотурбинной установки определяется повышением температуры подвода тепла перед газовой турбиной, а также степенью совершенством проточной части компрессора и турбины. В настоящий момент достигнута и освоена температура перед газовой турбиной 1600 °С, которая определяет КПД газотурбинной установки 42÷44 %. Проводятся широкие исследования для перехода в ГТУ на температуру газов перед турбиной 1700 °С, которая позволит достичь электрического КПД 45-46 %. В тоже время повышение температуры газов перед турбиной в ГТУ приводит к увеличению температуры отработавших в ней продуктов сгорания, что в свою очередь влечет повышения КПД котла-утилизатора. Так, для одной из самых мощных в настоящее время ГТУ в мире – GE 9HA.02 температура продуктов сгорания после газовой турбины составляет 645 °С, которая определяет величину температуры водяного пара перед паровой турбиной – 620 °С.

КПД котла-утилизатора также определяется температурой газов на выходе из тракта, которая не может быть ниже 75 °С исходя из условий надежной работы хвостовых поверхностей нагрева.

КПД паротурбинной установки определяется начальной температурой водяного пара и температурой отвода тепла. Для увеличения КПД ПГУ применяют двух- и трехконтурные котлы-утилизаторы и промежуточный перегрев пара, с целью наиболее эффективного использования энергии тепла уходящих от ГТУ газов.

Из представленного выше следует, что дальнейшее повышение эффективности генерации энергии на ПГУ при работе ПГУ на водяном паре возможно лишь за счет увеличения температуры газов перед газовой турбиной.

Из условий работы ГТУ определяется температура подвода тепла в цикле ПТУ, поэтому повышение КПД ПТУ возможно при снижении температуры отвода в цикле, поэтому предлагается использовать к качестве рабочего тела для нижнего цикла в ПГУ НКВ, а отвод тепла осуществлять в воздушном конденсаторе. В данном случае ответственным и важным является вопрос правильного выбора НКВ в качестве рабочего тела для нижнего цикла ПГУ. Для множества НКВ предельная температура, после которой начинается термическое разложение, составляет от 200 до 300 °С. Поэтому, чтобы применять НКВ в парогазовой установке без снижения КПД, необходимо использовать три цикла: цикл ГТУ, цикл ПТУ на водяном паре, который снизит температуру продуктов сгорания до 200 °С и цикл на НКВ.

В мировой научной литературе серьезных исследований на данную тему не было обнаружено. Поэтому разработка оптимальной тепловой схемы ПГУ с тремя циклами и поиск оптимальных параметров рабочих веществ может являться актуальной задачей.

Также актуальным вопросом является возможность конденсации НКВ нижнего цикла ПГУ в воздушном конденсаторе с целью достижения в зимнее время года при отрицательных температурах максимальных значений КПД ПГУ.

В научно-квалификационной работе поставлена задача повышения эффективности генерации энергии на ПГУ утилизационного типа с циклами на 3х рабочих телах, в которой верхний цикл работает на продуктах сгорания топлива, средний – на воде и водяном паре, нижний – низкокипящем веществе, конденсация НКВ осуществляется в воздушном конденсаторе.