

УДК 621.438

## **Комбинированная энергетическая установка с утилизационным паровым контуром на низкокипящем рабочем теле**

*Казинов Е.А., студент  
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
кафедра «Газотурбинные и нетрадиционные энергоустановки»*

*Научный руководитель: Тумашев Р.З, к.т.н., доцент  
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
кафедра «Газотурбинные и нетрадиционные энергоустановки»  
[e3@bmstu.ru](mailto:e3@bmstu.ru)*

### **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время в условиях роста цен на различные виды топлива решение проблемы энергосбережения является ключевым фактором уменьшения себестоимости производства продукции и повышения ее рентабельности на рынке. Основные направления энергосбережения:

- использование низкопотенциальной энергии промышленных предприятий и различных установок;
- создание простых и надёжных энергетических установок для производства тепловой и электрической энергии, работающих на местных видах топлива;
- использование возобновляемых источников энергии.

Также, в современном мире одной из важнейших задач является задача сохранения и охраны окружающей среды. Особенное значение уделяется вопросу, связанному с эмиссией загрязняющих веществ на различных производствах. На данный момент предложены различные методы решения перечисленных проблем, но основным является организация утилизации низкопотенциальной теплоты уходящих дымовых газов предприятий и продуктов сгорания газотурбинных установок, что позволяет значительно повысить энергосбережение на различных объектах и уменьшить влияние на экологию различного рода вредных веществ.

Существуют технологии, позволяющие использовать низкопотенциальную энергию для выработки электроэнергии. Данные технологии экономически выгодны, технически целесообразны, их применение предполагает использование отработанных технологических процессов производства. Утилизация теплоты возможна на

нефтедобывающих скважинах, газоперекачивающих станциях, металлургических и химических заводах, на энергетических станциях.

Возможны различные способы утилизации теплоты выхлопных газов газотурбинных установок и предприятий с целью выработки электроэнергии и получения полезной теплоты: в котле-утилизаторе, в паротурбинных установках с котлом-утилизатором, в утилизационной газотурбинной установке открытого цикла. Еще одним решением может быть использование утилизационной паротурбинной установки с использованием органического цикла Ренкина.

В данной работе рассматривается комбинированная установка для выработки электроэнергии, состоящая из газотурбинной установки (ГТУ) открытого цикла и паротурбинной установки (ПГУ), работающей по органическому циклу Ренкина, рабочим телом которой является пентан. ГТУ является не только основным источником электроэнергии, но и «поставщиком» низкопотенциальной энергии теплоты уходящих газов. ПГУ позволяет утилизировать сброшенную теплоту и параллельно вырабатывать дополнительную электроэнергию.

## ОПИСАНИЕ СХЕМЫ УСТАНОВКИ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Принципиальная схема парогазовой установки (ПГУ) представлена на рис. 1.

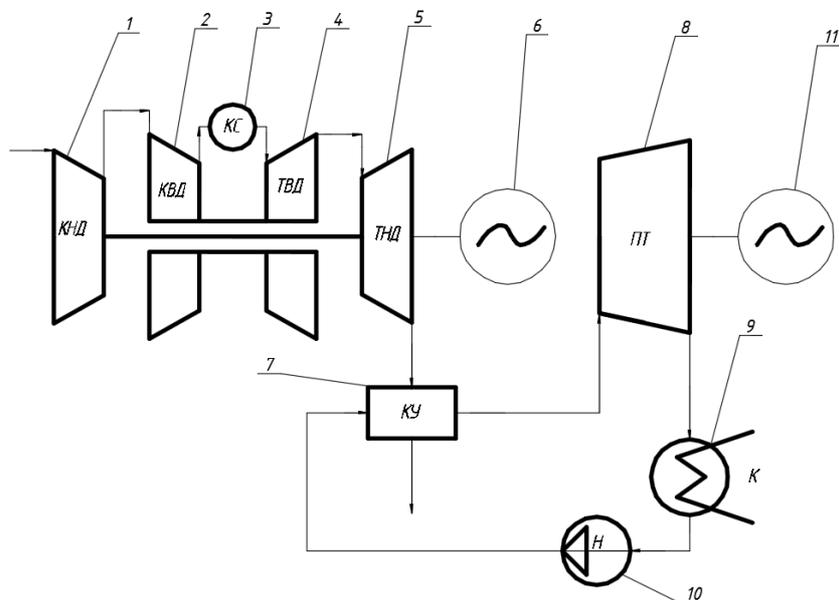


Рис. 1. Принципиальная схема парогазовой установки:

- 1 – компрессор низкого давления; 2 – компрессор высокого давления; 3 – камера сгорания; 4 – турбина высокого давления; 5 – турбина низкого давления; 6 – электрогенератор; 7 – котел-утилизатор; 8 – паровая турбина; 9 – конденсатор; 10 – насос; 11 – электрогенератор

Установка работает следующим образом: воздух из атмосферы попадает в осевой воздушный компрессор низкого давления 1, в котором воздух сжимается до определенного давления и температуры. Затем воздух поступает в компрессор высокого давления 2, где происходит его дальнейший нагрев и повышение давления. После воздух попадает в камеру сгорания 3. Одновременно с воздухом в камеру сгорания поступает горючее, в качестве которого используется природный газ. В результате процесса горения продукты сгорания топливного газа нагреваются до рабочей температуры и поступают в турбину высокого давления 4. Отработав в турбине высокого давления, рабочее тело поступает в турбину низкого давления 5, которая приводит в движение компрессор низкого давления и электрогенератор 6. Далее выхлопные газы направляются в котел-утилизатор 7, где используются для нагрева рабочего тела паротурбинной установки (пентан) и преобразования его в паровую фазу. Пентан поступает в паровую турбину 8, где происходит процесс совершения работы и получения полезной мощности в виде электроэнергии, вырабатываемой в электрогенераторе 11. После паровой турбины пентан подается в конденсатор 9, где происходит его преобразование до жидкой фазы. Далее насос 10 перекачивает рабочее тело в котел-утилизатор и процесс повторяется вновь.

Термодинамический цикл парогазовой установки в координатах Т–S представлен на рис. 2.

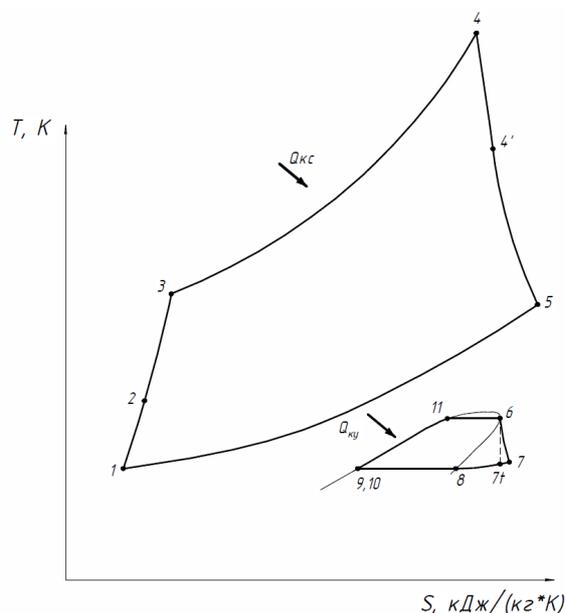


Рис. 2. Термодинамический цикл парогазовой установки в координатах Т–S:  
 1-2 – процесс сжатия воздуха в компрессоре низкого давления; 2-3 – процесс сжатия воздуха в компрессоре высокого давления; 3-4 – процесс горения в камере сгорания ( $Q_{кc}$  – подведенная в процессе теплота); 4-4' – процесс расширения продуктов сгорания в турбине высокого давления; 4'-5 – процесс расширения продуктов сгорания в турбине

низкого давления; 5-1 – процесс отвода теплоты из ГТУ; 6-7 – процесс расширения пентана в паровой турбине в реальном процессе; 6-7t – процесс расширения пентана в паровой турбине в идеальном процессе; 7-8 – процесс охлаждения пентана в конденсаторе; 8-9 – процесс конденсации пентана в конденсаторе; 9-10 – процесс повышения давления пентана в насосе; 10-11 – процесс подвода теплоты к пентану в котле-утилизаторе ( $Q_{кy}$  – подведенная в процессе теплота); 11-6 – процесс испарения пентана в котле-утилизаторе

Рассмотрим цикл установки, реализующий данную схему, с параметрами, приведенными в таблице 1.

Таблица 1

Исходные данные для комбинированной установки

Параметр	Значение
Температура газа перед турбиной высокого давления ГТУ, К	1673
Электрическая мощность газотурбинной установки, МВт	30
Суммарная степень повышения давления компрессоров в ГТУ, -	10...100
Расход уходящих газов из ГТУ, кг/с	68...110
Температура уходящих газов при выходе из ГТУ, К	1060...617
Температура после конденсатора паротурбинной установки на пентане, К	308
Давление после конденсатора паротурбинной установки на пентане, МПа	0.0972
Температура продуктов сгорания на выходе из котла-утилизатора, К	373
Давление пара на входе в паровую турбину на пентане, МПа	0.4...3
КПД насоса паротурбинной установки на пентане, -	0.9
КПД паровой турбины на пентане, -	0.83
КПД паропровода паротурбинной	0.99

установки на пентане, -	
Расход воздуха на охлаждение деталей турбины высокого давления ГТУ, %	6
Расход воздуха на охлаждение деталей турбины низкого давления ГТУ, %	5
Суммарные утечки в контуре ГТУ, %	1.5

### АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В результате проведенных численных исследований были получены максимумы КПД газотурбинной, паротурбинной и комбинированной установок, а также установлены параметры, при которых достигаются данные максимумы. Выполнены расчетные исследования по определению суммарной степени повышения давления компрессоров ГТУ и температуры уходящих газов, при которой достигается максимальный КПД комбинированной установки. Был проведен численный анализ влияния давления перед паровой турбиной на КПД ПТУ и вырабатываемую мощность как парового контура, так и всей установки в целом. Пример результатов расчета цикла комбинированной установки при суммарной степени повышения давления в компрессорах ГТУ и давлениях перед паровой турбиной на пентане в диапазоне 10-100 и 0.4-3 МПа соответственно приведен в таблице 2.

Таблица 2

Результаты расчета цикла комбинированной установки при суммарной степени повышения давления в компрессорах ГТУ и давлениях перед паровой турбиной на пентане в диапазоне 10-100 и 0.4-3 МПа

Параметр	Значение		
Суммарная степень повышения давления компрессоров в ГТУ, -	10	40	80
Расход уходящих газов из ГТУ, кг/с	68	71.4	94.3
Температура уходящих газов при выходе из ГТУ, К	1060	773	653
КПД газотурбинной части, %	33	43	42.3
КПД паротурбинной части при давлении пара перед паровой турбиной на пентане 0.4 МПа, %	9.8		
КПД паротурбинной части при давлении пара перед паровой турбиной на пентане 1.5 МПа, %	15.8		
КПД паротурбинной части при давлении пара перед	18.1		

паровой турбиной на пентане 3 МПа, %			
КПД комбинированной установки при давлении пара перед паровой турбиной на пентане 0.4 МПа, %	39.3	47.7	46.5
КПД комбинированной установки при давлении пара перед паровой турбиной на пентане 1.5 МПа, %	43	50.6	49.1
КПД комбинированной установки при давлении пара перед паровой турбиной на пентане 3 МПа, %	44.5	51.7	50.1

Как видно из таблицы 2, с ростом давления перед паровой турбиной растет КПД как пентанового контура, так и суммарный КПД всей установки. Это объясняется следующим. При повышении давления перед пентановой паровой турбиной растет и теплоперепад, срабатываемый в турбине. Следовательно, растет работа цикла ПТУ, КПД ПТУ и суммарный КПД комбинированной установки.

С ростом степени повышения давления в ГТУ происходит увеличение расхода уходящих газов из ГТУ, но одновременно происходит снижение температуры на выходе из газотурбинного контура. В конечном счете это приводит к снижению расхода рабочего тела в ПТУ при принятой и зафиксированной температуре уходящих газов из котла-утилизатора и, как следствие, к снижению вырабатываемой мощности. При одном и том же расходе выхлопных газов из ГТУ и при увеличении расхода паротурбинного контура происходит снижение вредных выбросов ГТУ, уменьшается тепловое загрязнение окружающей среды, увеличивается суммарная мощность комбинированной установки. Компрессора и турбины ГТУ с более низкой степенью повышения давления получают с меньшим числом ступеней, уменьшаются их габариты. Зависимость электрической мощности пентановой паровой установки от расхода рабочего тела ПТУ при различных температурах уходящих газов из ГТУ приведена на рис. 3.

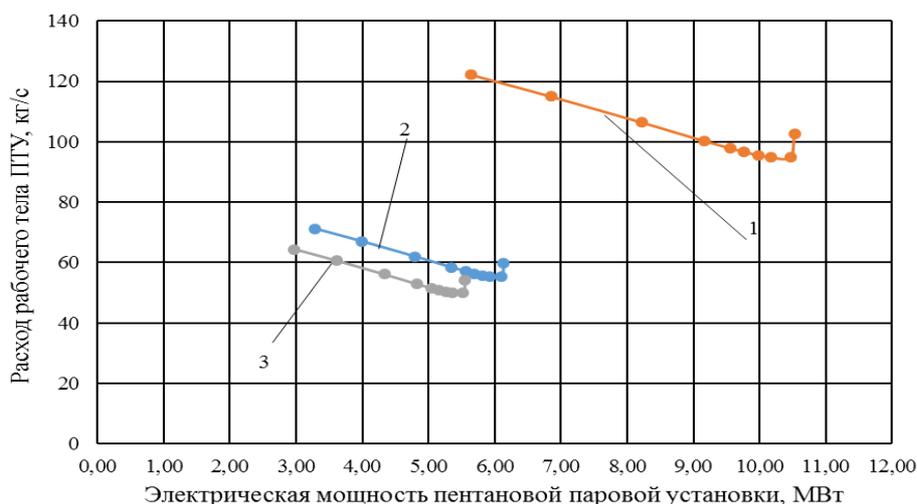


Рис. 3. Зависимость электрической мощности пентановой паровой установки от расхода рабочего тела ПТУ при различных температурах уходящих газов из ГТУ:

1 – 1060 К; 2 – 773 К; 3 – 653 К

Из рисунка 3 следует, что с увеличением температуры уходящих газов из ГТУ увеличивается и электрическая мощность пентановой паровой установки. Также растет и расход пентана в паротурбинном контуре при принятой температуре уходящих газов из котла-утилизатора. Однако, увеличение расхода органического рабочего тела ПТУ приводит к увеличению габаритов узлов установки, повышению затрат на их обслуживание.

Выработанную генератором ПТУ электроэнергию можно направить непосредственно потребителю, особенно в случае электростанций, поскольку их стараются располагать как можно ближе к целевому потребителю, что повышает рентабельность данных установок. Однако, значение электрической энергии, отдаваемой потребителю, будет несколько меньше (на 15-25 %), чем количество энергии, вырабатываемой генератором. Это обуславливается отбором электрической мощности на собственные нужды: для работы вентилятора конденсатора, главного циркуляционного насоса, систем автоматики и управления установкой и т.д.

Целесообразно выбирать большие значения давлений перед пентановой паровой турбиной комбинированной установки с целью обеспечения максимального КПД цикла. Также, при увеличении давления снижаются размеры пентановой паровой турбины паротурбинного контура. При работе парового контура на пентане возможно применение одноступенчатых центростремительных турбин. Соответственно, снижаются затраты на производство по сравнению с традиционными паровыми установками на водяном паре, где применяются многоступенчатые осевые турбины. На рисунке 4 представлена

зависимость КПД паротурбинного цикла от давления перед пентаановой паровой турбиной. На рисунке 5 представлены зависимости КПД цикла комбинированной установки от давления перед пентаановой паровой турбиной и различных температурах выхлопных газов ГТУ.

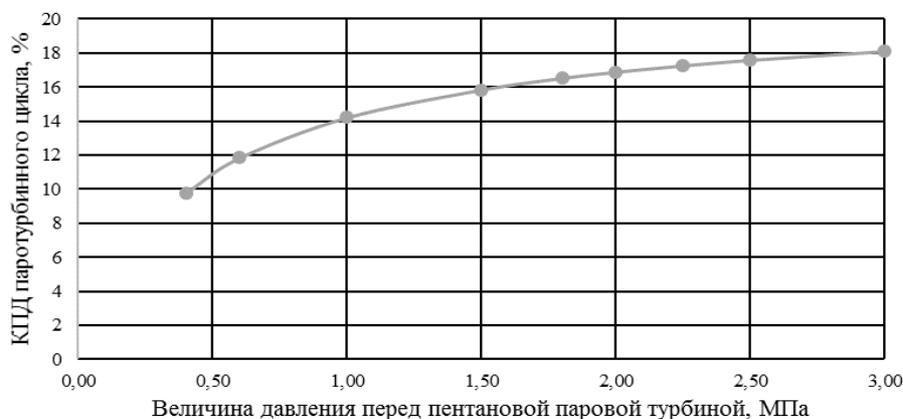


Рис. 4. Зависимость КПД паротурбинного цикла от давления перед паровой турбиной

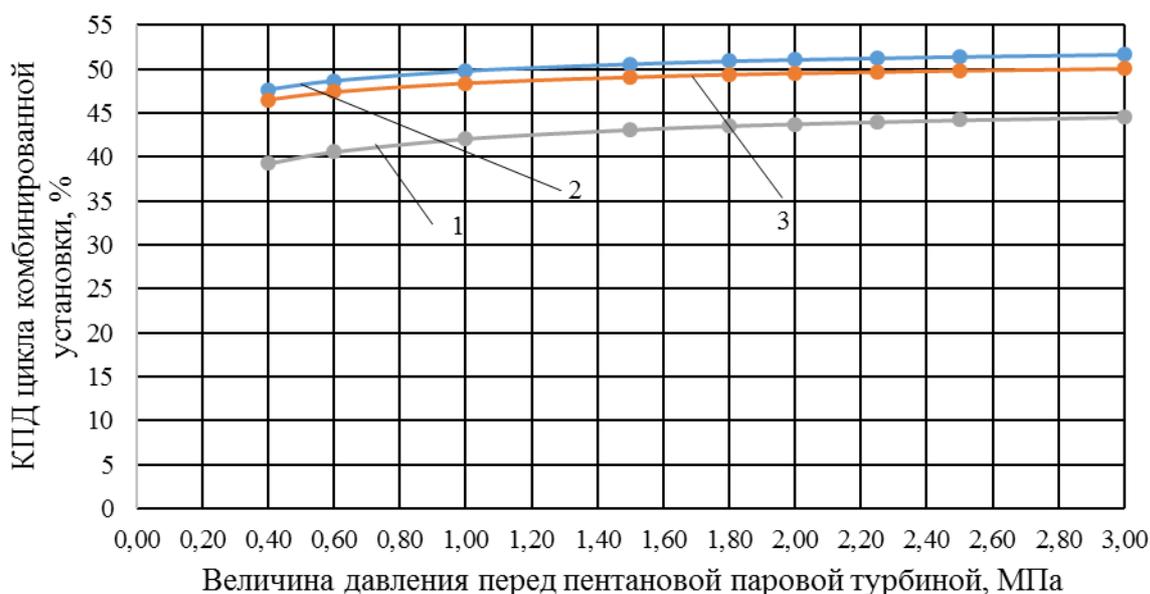


Рис. 5. Зависимости КПД цикла комбинированной установки от давления перед пентаановой паровой турбиной и различных температурах дымовых газов ГТУ:

1 – 1060 К; 2 – 773 К; 3 – 653 К

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Утилизация уходящих из ГТУ газов является перспективным направлением для исследования и широкого внедрения таких установок на производстве.

Расчётные исследования показали, что наибольшая эффективность комбинированной установки будет достигнута при выборе максимально возможного

давления перед пентановой паровой турбиной и при степени повышения давления ГТУ, которая соответствует максимуму КПД цикла газотурбинной части. При температуре рабочего тела перед турбиной высокого давления ГТУ 1673 К, при степени повышения давления ГТУ, равной 40, и при давлении в 3 МПа перед пентановой паровой турбиной паротурбинного контура становится возможным получение суммарного КПД, превышающего 50 % для такого рода комбинированных установок.

Применение утилизационной установки на низкокипящем рабочем теле позволяет снизить тепловое загрязнение окружающей среды. Утилизационная установка обеспечивает производство дополнительного количества электроэнергии от 10 % до 30 % от мощности ГТУ.

Факторами, препятствующими применению подобных схем, являются взрывоопасность низкокипящих рабочих тел при соединении с кислородом, слабое развитие оборудования, работающего на органических рабочих телах. Но, в связи с современной тенденцией правительства РФ на энергосбережение во всех отраслях промышленности, анализ низкокипящих рабочих тел и способов их применения, создание простых и надежных установок, работающих на НРТ, полностью отвечают современной энергосберегающей политике.

#### Список литературы

1. Тумашев Р.З., Моляков В.Д., Лаврентьев Ю.Л. Повышение эффективности компрессорных станций магистральных газопроводов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2014. № 1. С. 68–79.
2. Осипов М.И., Моляков В.Д., Олесевич К.А., Тумашев Р.З. Перспективные направления повышения эффективности ГТУ // Газотурбинные технологии. 2011. № 3. С. 2–7.
3. Логинова Е. А. Повышение энергетической эффективности тепловых электрических станций с использованием низкокипящих рабочих тел в паротурбинных циклах. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Санкт-Петербург, 2014. 141 с.
4. Смирнов Ю.А. Анализ цикла Ренкина с учетом необратимых потерь: метод. указания. Санкт-Петербург. гос. техн. ун-т, 1999. 18 с.
5. Leslie N.P., Zimron O., Sweetser R.S., Stovall T.K. Recovered energy generation using an organic Rankine cycle system // CH-09-024, 2009. P. 220–230.
6. Лыков А. И. Выбор и расчетное обоснование характеристик утилизационной паротурбинной установки для выработки электроэнергии на собственные нужды

газоперекачивающих компрессорных станций. Диссертация на соискание ученой степени канд. технических наук. Санкт-Петербург, 2014. 229 с.

7. Гринман М. И., Фомин В. А. Перспективы применения энергетических установок с низкокипящими рабочими телами // Новости теплоснабжения. 2010. № 7. С. 13–18.
8. Готовский М. А., Гринман М. И., Фомин В. А., Арефьев В. К., Григорьев А. А. Использование комбинированного пароводяного и органического циклов Ренкина для повышения экономичности ГТУ и ДВС // Теплоэнергетика. 2012. № 3. С. 56–61.