

## ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛА ГАЗОВ В ПАРОГАЗОВЫХ УСТАНОВОК

Усманова Абдорбек Назиржан угли

Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова,  
магистр

Нормуминов Джахангир Абдусамиевич

Заведующий кафедрой энергосбережения и энергетического аудита

<https://doi.org/10.5281/zenodo.8019671>

**Аннотация:** Рассмотрены технические решения по повышению энергоэффективности газотурбинных установок, включающие охлаждение циклового воздуха и комбинированную выработку тепловой и электрической энергии и воды. Приведены схема интегрированной установки и результаты технико-экономической оценки ее эффективности

**Ключевые слова:** Газотурбинная установка, охлаждение воздуха, энерго-, водообеспечение, эффективность

### INCREASING ENERGY EFFICIENCY THROUGH THE USE OF THE HEAT OF GAS IN COMBINED POWER PLANT

**Annotation:** The authors reviewed the technical solutions to improve the efficiency of gas turbine plants, including the cooling cycle of the air and co-generation of heat, electricity and water. An integrated circuit setup and the results of technical and economic evaluation of its effectiveness are provided.

**Key words:** Gas turbine plant, air cooling, energy of water supply, effectiveness

### ВВЕДЕНИЕ

Газотурбинные установки (ГТУ) являются в настоящее время одним из основных типов привода газоперекачивающих агрегатов (ГПА) компрессорных станций и широко используются в парогазовых установках (ПГУ) при модернизации и обновлении оборудования тепловых электростанций и котельных, а также строительстве новых источников энергообеспечения. Основная причина преобладания ПГУ в структуре вновь вводимых энергетических объектов заключается в повышении их КПД до 58-60% [1] (при прогнозируемом его увеличении до 65%).

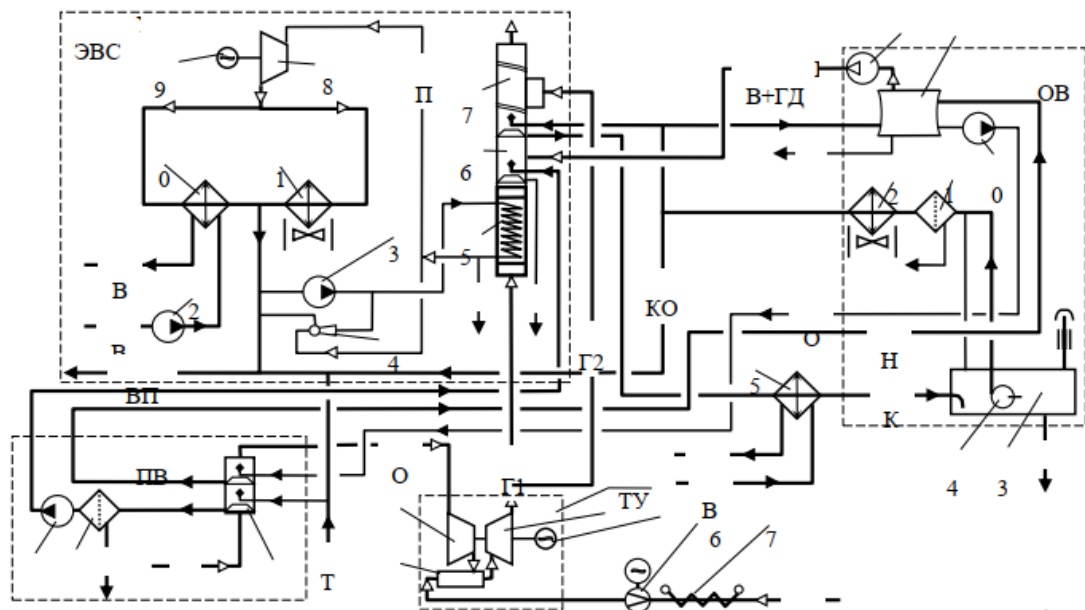
Классические ПГУ строятся по принципу сочетания газотурбинного и паротурбинного циклов, работающих по собственным тепловым схемам. ГТУ ГПА аналогичным образом обустраиваются котлами-утилизаторами (КУ). При наличии предтопка у КУ с линиями подачи воздуха и топлива такое комбинирование дает возможность автономной работы каждой установки без остановки всего блока.

Основным недостатком ГТУ является снижение их полезной мощности в условиях повышенных температур окружающего воздуха. Предлагаемая новая схема позволяет повысить энергоэффективность ГТУ при эксплуатации ее в составе комбинированных ПГУ и установок энерговодоснабжения (УЭВС) [2, 3], а также стабилизировать мощность ГТУ в переменных режимах.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При работе установки топливный газ высокого давления (поток ГТ на рис. 1), поступает на вход детандер-генератора 26, на котором обеспечивается снижение давления

газа до рабочего давления перед ГТУ (в состав которой входит камера сгорания 1, воздушный компрессор 2, газовая турбина 3 и потребитель механической энергии – электрогенератор 4). Выработанная в детандер-генераторе электрическая энергия подается на электронагреватель 27 топливного газа, обеспечивающий без гидратного режима эксплуатации системы газоснабжения ГТУ. Использование детандер-генератора позволяет, по сравнению с традиционными техническими решениями, уменьшить расход топливного газа на собственные нужды (на нагрев потока дросселируемого газа) системы газоснабжения ГТУ.



Установки: ГТУ – газотурбинная; УПВ – подготовки воздуха; УОВ – охлаждения воды; ЭВС – энергоснабжения;

технологические потоки: В, ВО – воздух атмосферный и охлажденный; ВК, ВКО – конденсат водяных паров; ВП – водяные пары; ВТ – вода техническая; ГД – газы дегазации; ГТ – газ топливный; Д – дренажные

стоки; ДГ1, ДГ2 – дымовые газы; ДН, ДО – дистиллят нагретый и охлажденный; ПВ, ОВ – прямая и обратная вода системы теплоснабжения; ПП – пар перегретый; ХПВ – вода на установку подготовки хозяйственной воды; аппараты: 1 – камера сгорания; 2 – воздушный компрессор; 3 – газовая турбина; 4, 19 – потребители механической энергии (электрогенераторы); 5 – воздухопромыватель; 6, 11 – фильтры; 7, 10, 14, 22, 23 – насосы; 8 – испаритель; 9 – вакуум-компрессор; 12, 21 – аппараты воздушного охлаждения; 13 – емкость конденсата; 15 – КУ; 16 – газоохладитель; 17 – дымовая труба; 18 – паровая турбина; 20, 25 – теплообменники-подогреватели воды; 24 – пароструйный насос; 26 – детандер-генератор; 27 – электронагреватель газа

**Рис. 1. Принципиальная схема ПГУ с установкой стабилизации мощности ГТУ**

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Запыленный атмосферный воздух поступает на установку его подготовки (УПВ) в первую ступень воздухопромывателя 5, в которую через форсунки производится впрыск технической воды. При контактном теплообмене происходит обеспыливание воздуха и его охлаждение за счет частичного испарения воды (или охлажденного конденсата водяных паров – части потока ВКО). Дальнейшее охлаждение воздуха происходит на второй ступени

эжекторного воздухопромывателя, на форсунки которой подается охлажденный дистиллят. Охлажденный воздух поступает в воздушный компрессор 2, нагнетающий воздух в камеру сгорания 1 ГТУ. Эжектирование потока воздуха спутными потоками распыленной форсунками воды обеспечивает практически отрицательные аэродинамические потери воздухопромывателя и наибольшую его энергоэффективность среди известных конструкций.

За счет охлаждения циклового воздуха массовая производительность воздушного компрессора повышается и, тем самым обеспечивается стабилизация (исключение потерь мощности) ГТУ в жаркое время года. Обеспыливание воздуха обеспечивает повышение моторесурса ГТУ за счет исключения эрозионного износа лопаток.

Выхлопные газы ГТУ поступают в паровой КУ 15, в котором за счет рекуперации их теплоты генерируется перегретый пар, подаваемый в паровую теплофикационную турбину 18, подключенную к потребителю механической энергии 19 (на рис. 1 – к электрогенератору). Расход дымовых газов (поток ДГ1), поступающих в КУ, и соответственно, его теплопроизводительность, регулируется с помощью дымового шибера. Охлажденные в КУ дымовые газы поступают двухступенчатый эжектор-ный газоохладитель 16. Остальная часть дымовых газов (поток ДГ2), подается в дымовую трубу 17, минуя КУ и газоохладитель.

Следует отметить, что предварительное охлаждение в КУ дымовых газов, поступающих затем в газоохладитель, обеспечивает снижение энергозатрат на генерацию водяного конденсата (из водяных паров), поскольку уменьшается энергопотребление привода вентилятора охладителя конденсата 12.

В первой ступени газоохладителя дымовые газы охлаждаются и увлажняются в процессе тепло и массообмена с предварительно очищенной от механических примесей в фильтре 6 технической водой, подаваемой на форсунки из воздухопромывателя 5 насосом 7. Не испарившаяся часть воды сбрасывается в дренаж.

Во второй ступени газоохладителя происходит дальнейшее охлаждение и осушка дымовых газов за счет впрыска через форсунки в их спутный поток охлажденного конденсата водяных паров. Охлажденные дымовые газы по дымовой трубе 17 отводятся в атмосферу.

Применение двухступенчатого эжекторного газоохладителя снижает газодинамические потери по тракту выхлопных газов ГТУ вследствие эжекции потока газов «факелами» распыла охлаждающей воды.

Нагретый конденсат, а также сконденсированные из дымовых газов водяные пары (поток ВК) подаются вначале в теплообменник подогрева теплофикационной воды 25, а затем поступают в емкость водяного конденсата (деаэратор) 13. Деаэрированный водяной конденсат насосом 14 через фильтр 11 подается в охладитель конденсата 12. Охлажденный конденсат водяных паров (поток ВКО) подается на форсунки второй ступени газоохладителя, а также на подпитку испарителя 8 установки охлаждения воды (УОВ). Обязка установки предусматривает подачу охлажденного водяного конденсата на форсунки первой ступени воздухопромывателя (при низком качестве или отсутствии технической воды), входы питательного насоса 23 и пароструйного насоса 24 для подпитки КУ, вход сетевого циркуляционного насоса 22 для подпитки системы теплоснабжения, а также на установку подготовки хозяйственной воды (поток ХПВ).

Необходимый температурный уровень охлажденного воздуха перед воздушным компрессором ГТУ обеспечивается испарителем 8 УОВ, в котором происходит частичное

испарение нагретого дистиллята (поток ДН), поступающего из второй ступени воздухопромывателя. Отвод теплоты испарением от потока нагретого дистиллята в испарителе интенсифицируется за счет вакуума, создаваемого вакуум-компрессором 9. Отбираемая из испарителя парогазовая смесь (поток ВП+ГД) подается в патрубок между первой и второй ступенями газоохладителя. Водяные пары из парогазовой смеси конденсируются на второй ступени газоохладителя совместно с водяными парами влажных дымовых газов, поступивших из первой ступени, тем самым способствуя повышению энергоэффективности установки за счет исключения потерь водяного конденсата.

Охлажденный дистиллят (поток ДО) из испарителя подается циркуляционным насосом 10 на форсунки второй ступени воздухопромывателя, обеспечивая оптимальную температуру охлажденного воздуха, исключая потери мощности ГТУ в жаркое время года или образование ледяных отложений в проточной части воздушного компрессора (и снижение мощности и моторесурса) в холодное время года.

### ОБСУЖДЕНИЕ

Технико-экономическая эффективность использования УПВ и УОВ в структуре ПГУ оценивается по значениям сравнительного интегрального социально-экономического эффекта ( $\Delta Z_{\Sigma}$ ) или чистого дисконтированного дохода (ЧДД)

$$\Delta Z_{\Sigma} = \sum_{\tau=0}^T (\Delta Z_{\tau}^{np} + \Delta Z_{\tau}^{n}) (1 + E)^{\tau_0 - \tau} + \Delta \Phi_T (1 + E)^{-T} \xrightarrow{y \rightarrow opt} max,$$

где  $\Delta Z_{\tau}^{np}$ ,  $\Delta Z_{\tau}^{n}$  - соответственно, экономия затрат при производстве и потреблении электрической и тепловой энергии, водоснабжении и водоотведении в  $\tau$ -й год эксплуатации энергоэффективной ПГУ (с УПВ, УОВ и УЭВС) по сравнению с базовым вариантом ПГУ (без охлаждения воздуха ГТУ и выработки воды);  $\Delta \Phi_T$  - разность остаточной стоимости основных фондов вариантов на конец расчетного периода времени  $T$ ;  $E$  - норматив приведения затрат и эффектов к единому времени.

Сравнение вариантов ПГУ выполнено при одинаковом уровне надежности энергообеспечения технологических потребителей в  $\tau$ -й год эксплуатации.

Основные технико-экономические показатели инвестиционного проекта создания и функционирования ПГУ с установками повышения ее энергоэффективности в структуре многопрофильного предприятия переработки газа в сопоставлении с базовым вариантом ПГУ (таблица) определены с использованием разработанного программного обеспечения [4].

В состав ПГУ включены три ГТУ типа GT8C2 фирмы ALSTOM, три котла-утилизатора КУ-93 и три паровых турбины К-6-2.4 КТЗ.

Показатели вариантов ПГУ

Показатель, единица измерения	Вариант ПГУ	
	базовый	энергоэффективный
Установленная мощность, МВт	192	192
–электрическая	163	163
–тепловая		

Удельный расход топлива на выработку энергии – электрической, т у. т./МВт·ч – тепловой, т у. т./ГДж	0,162 0,045	0,145 0,045
Годовая выработка энергии: – электрической, МВт·ч – тепловой, тыс. ГДж	1 549 008 4875,9	1 562 400 4875,9
Капитальные затраты, млн. сум.	6219,9	6267,8
Годовые эксплуатационные затраты на производство и потребление энергоносителей, воды, водоотведение, млн. сум.	451,9	420,7
Интегральный эффект (ЧДД), млн. сум., (за 10 лет)	13263,2	13516,1
Индекс доходности, сум./ сум.	2,13	2,16
Срок окупаемости, лет	5,3	5,2
Себестоимость: – электроэнергии, сум./кВт·ч – тепловой энергии, сум./ГДж	0,498 138,7	0,485 136,4

Затраты на дополнительное оборудование УПВ и УОВ определены по необходимой суммарной холодопроизводительности испарителей, равной 11 МВт.

Разность отдельных показателей в % базового и энергоэффективного вариантов ПГУ анализ которого показывает, что базовый вариант характеризуется меньшими капитальными затратами. Однако и интегральный эффект этого варианта также меньше.

Энергоэффективный вариант ПГУ характеризуется уменьшением эксплуатационных затрат (без отчислений от капитальных затрат на амортизацию и ремонт оборудования) почти на 7%. Себестоимость выработки тепловой и электрической энергии для этого варианта также меньше по сравнению с базовым.

Таким образом, при небольших различиях в сроке окупаемости и индексе доходности внедрение ПГУ с охлаждением циклового воздуха ГТУ и выработкой воды экономически целесообразно.

### ВЫВОД

Повышение энергоэффективности ГТУ в структуре ПГУ и компрессорных станций обеспечивается за счет ее комбинирования с установками охлаждения воды и воздуха. Стабилизация мощности ГТУ при повышенной температуре окружающего воздуха и выработка воды в комбинированных установках электротепловодоснабжения позволяют снизить себестоимость вырабатываемой электроэнергии на 2,4%, тепловой энергии – на 1,6% при незначительном увеличении капитальных затрат на дополнительное оборудование.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Ольховский Г.Г. Применение газотурбинных и парогазовых установок в энергетике (обзор) / Г.Г. Ольховский, В.В. Гончаров. М.: Комиссия по газовым турбинам РАН. Ассоциация газотурбинных технологий для энергетике и промышленности, 2005. 27 с.
2. Пат. 118360 УР, МПК F01K 17/02. Установка электро-тепло-водоснабжения

- предприятий добычи, транспорта и переработки углеводородного сырья / Долотовский И.В. 2012109097; заявл. 11.03.2012; опубл. 20.07.2012, Бюл. № 20.
3. Пат. 134993 РУ, МПК F01K 17/02. Установка электро-тепло-водоснабжения / И.В. Долотовский, А.В. Ленькова, Н.В. Долотовская. № 2013130457; заявл. 02.07.2013; опубл. 27.11.2013, Бюл. № 33.
  4. Система «Энергоресурс»: программа для ЭВМ № 2010615353 / Е.А. Ларин, И.В. Долотовский, Н.В. Долотовская. №2010613798; заявл. 29.06.10; зарегистр. 20.08.10.
  5. Повышение эффективности теплоэнергоснабжения производства изопрена на основе парогазовых технологий /Бальзамов Денис Сергеевич/ Казань 2010
  6. Китаев С.В. Энергосбережение при эксплуатации приводных газотурбинных установок на ГТЭС // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2009.
  7. Феофанов Д.И. Современные подходы к оценке эффектов от внедрения энергосберегающих технологий в различных секторах экономики // Российское предпринимательство [Электронный ресурс]. – 2010.
  8. Термадинамика и теплотехника/ Р.А.Захидов, Г.Н.Узоков/ Ташкент 2021