

## ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ТЭЦ-2 ПРИ СНИЖЕНИИ УРОВНЯ ПОТРЕБЛЕНИЯ ПАРА ИЗ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ОТБОРА ПРОМЫШЛЕННЫМ ПОТРЕБИТЕЛЕМ

А. А. Будников<sup>1</sup>

<sup>1</sup>arsenybudnikov@mail.com

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (УУНИТ)

**Аннотация.** В рамках ранее разработанной тепловой схемы теплоэлектроцентрали Уфимской ТЭЦ-2, в данной работе рассматривается возможность повышения эффективности ее работы путем проведения модернизация паровой турбины ПТ-65/75-130/13 в связи с прекращением потреблением пара производственных отборов паровых турбин ПТ-65/75-130/13 № 4 и 5 Уфимской ТЭЦ-2, за исключением площадки № 1 ПАО «УМПО». Предлагаемые способы модернизации теплоэлектроцентрали призваны повысить технико-экономические показатели работы ТЭЦ, обеспечить повышение надежности паротурбинных установок во время работы оборудования.

**Ключевые слова:** Теплоэлектроцентраль, технико-экономические показатели, надежность, паротурбинные установки, газотурбинные установки, парогазовые установки, цикл Брайтона-Ренкина, пропускная способность.

### ВВЕДЕНИЕ

Главной целью создания электрических станций является организация выработки электрической энергии для обеспечения этой энергией промышленного производства, коммунального хозяйства, воздушного и наземного транспорта, снабжения жилых зданий близлежащих районов горячим водоснабжением, поддержания работы предприятий путем снабжения их паром.

На электростанциях, основным назначением которых является производство электрической энергии, применяются паровые турбины с достаточно глубоким вакуумом. Это вызвано в первую очередь тем, что при этом большая часть энергии рабочего тела (пара) преобразуется в электрическую энергию. Однако в таком случае оставшаяся часть потока пара конденсируется, и значительная часть энергии, которая в нем содержалась, теряется.

Электростанции, спроектированные для комбинированной выработки электроэнергии и отпуска с них пара для различных потребителей, устанавливаются с паровыми турбинами с регулируемым отбором пара, также могут применяться паровые турбины с противодавлением. Особенностью таких станций является то, что, в отличие от конденсационных установок, теплота сработавшего в проточной части турбины пара частично или полностью (в случае применения турбин с противодавлением) используется для обеспечения промышленного или теплового сооружения. Но в таком случае в электрическую энергию преобразуется меньшая часть энергии пара при одних и тех же условиях, по сравнению с конденсационными электростанциями.

Существуют электростанции, отработавший пар которых используется и для выработки электроэнергии, и для теплоснабжения. Они получили название теплоэлектроцентралей (ТЭЦ). Как правило, их постройка происходит при непосредственной близости к потребителю, которым может выступать предприятие или жилые дома. Также существует и отдельная выработка электроэнергии и теплоты.

В таком случае электричество производится на конденсационных электростанциях, тогда как теплота – на отдельно установленных энергетических объектах (котельные).

В данной работе рассматривается работа Уфимской ТЭЦ-2. Вблизи теплоэлектроцентрали располагается промышленный потребитель, снабжающийся паром из производственных отборов паровых турбин № 4 и № 5 Уфимской ТЭЦ-2 ПТ-65/75-130/13.

В настоящее время в силу развития новых технологий производства и их непосредственному внедрению промышленный потребитель, находящийся непосредственно возле Уфимской ТЭЦ-2, испытывает меньшую необходимость в паре из производственных отборов паровых турбин станции. В качестве примера, на текущий момент расход пара из производственного отбора турбогенератора № 4 в зимний период составляет порядка 90 т/ч, в летний период – порядка 30 т/ч. В связи с этим может возникнуть ситуация дальнейшего снижения расхода так называемого «мятого» пара (пара, который уже частично прошел процесс своего расширения в проточной части турбины), что способствует росту эксплуатационных затрат. Также данная проблема приводит к снижению коэффициента использования оборудования – оно начинает простаивать, а сама турбина в этом случае становится ненагруженной относительно номинального режима ее работы, являющегося наиболее экономичным. Как результат, данная проблема приводит к тому, что установленное оборудование фактически не полностью включено в работу, что сказывается на получаемой прибыли в худшую сторону.

В работе рассмотрены различные способы повышения эффективности работы, заключающиеся в поиске оптимального технического решения, которое одновременно будет удовлетворять следующим условиям:

- 1) Текущие потребности промышленного потребителя должны удовлетворяться в полном объеме.
- 2) Текущие потребности теплофикационного потребителя должны удовлетворяться в полном объеме.
- 3) Установленная мощность станции в ходе проведения модернизации оборудования не должна измениться.

В ходе работы определены:

- 1) Предлагаемые пути решения существующей проблемы, связанной со снижением уровня потребления пара из производственного отбора промышленным потребителем.
- 2) Описание предлагаемых технических решений существующей проблемы.
- 3) Объем работ, необходимый для реализации указанного технического решения на Уфимской ТЭЦ-2.
- 4) Оценка изменения экономичности и эффективности работы станции при реализации рассматриваемого проекта.

### МОДЕРНИЗАЦИЯ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ЦСНД

В связи с сокращением уровня потребления пара из производственных отборов промышленными потребителями и отсутствием пропускной способности проточной части среднего давления цилиндра низкого давления паровой турбины ПТ-65/75-130/13 «невысокого» расхода пара в часть низкого давления снижается доля выработки электрической энергии на тепловом потреблении, что ухудшает технико-экономические показатели паровых турбин ПТ-65/75-130/13 № 4 и 5 на Уфимской ТЭЦ-2. Причин для этого несколько.

Под действием вращения с большой частотой в лопатке возникают большие центробежные силы и высокие напряжения растяжения, стремящиеся вырвать лопатку из диска [1].

Окружная сила, создающая полезный крутящий момент на валу турбины, изгибает лопатку в плоскости диска. Изгибающие силы, действующие на рабочие лопатки, не постоянны во времени, а непрерывно изменяются из-за различий в проходных сечениях сопловых каналов, из которых пар поступает на рабочие лопатки, а также наличия выходных кромок сопловых лопаток. Это приводит к возбуждению колебаний лопаток и возможности появления усталостных трещин, которые, увеличиваясь, могут достигнуть критического размера, после чего

произойдет внезапный отрыв лопатки.

Особенно большие переменные нагрузки действуют на рабочие лопатки парциальных, в частности, регулирующих ступеней. При прохождении лопатки перед группой сопел, из которых поступает пар, на нее действует полное усилие. При выходе лопатки из активной дуги подвода паровое усилие почти полностью пропадает. Это приводит к появлению большой переменной аэродинамической силы [1].

Рабочие лопатки первых ступеней ЦСД работают в условиях высоких температур, вызывающих явление ползучести.

Для рабочих лопаток последних ступеней турбин очень опасной является эрозия, приводящая к износу их поверхностей. Агрессивные примеси, содержащиеся в паре, вызывают коррозию и снижение сопротивления действию постоянных и переменных напряжений.

Рабочее облопачивание – это совокупность рабочих лопаток с хвостовиками и связями различного рода. Установленные вполне определенным образом профили рабочих лопаток образуют рабочую решетку, в которой происходит преобразование кинетической энергии потока пара в полезную кинетическую энергию вращения вала [1].

Короткие лопатки выполняют с постоянным по высоте профилем, длинные – с переменным. Длинные лопатки приходится выполнять в соответствии с изменяющимися по высоте треугольниками скоростей. Одновременно необходимо уменьшать их площадь от корневого сечения к периферийному, для того чтобы уменьшить центробежную силу рабочей части лопатки и напряжения в корневом сечении и хвостовике.

Особые меры применяются для защиты лопаток от эрозионного воздействия капель влаги при работе влажным паром. Крупные капли, вызывающие наиболее значительную эрозию, отстают от потока пара и в результате ударяют во входную часть спинки периферийной части лопатки. Поэтому часто прибегают к защите этой части лопатки с помощью стеллитовых (стеллит – сплав, содержащий 60 – 65% кобальта, 25 – 28% хрома и 4 – 5% вольфрама) пластинок, напаяваемых на лопатку токами высокой частоты.

Диафрагмы – кольцевые перегородки с сопловыми решетками, в каналах которых происходит преобразование тепловой энергии пара в кинетическую энергию его струй.

Диафрагма состоит из двух полукольцевых пластин, имеющих горизонтальный разъем, позволяющий установить ротор. Каждая половина диафрагмы состоит из соединенных между собой обода, которым диафрагма сопрягается с обоймой или корпусом турбины, тела и сопловых лопаток [1].

Основная нагрузка, действующая на диафрагму, – перепад давлений, под действием которого диафрагма прогибается, угрожая осевыми задеваниями. В первых ступенях ЦВД, где температура высока, под действием перепада давлений возникает явление ползучести: диафрагма приобретает остаточный прогиб по ходу пара. При этом сокращаются осевые зазоры и возникает еще большая опасность задеваний.

Сопловые аппараты первых ступеней ЦВД и ЦСД устанавливаются не в диафрагмах, а в специальных расточках в сопловых коробках, во внутреннем или наружном корпусе. Основная трудность при конструировании сопловых аппаратов состоит в использовании утечки пара мимо сопел.

Предлагаемая модернизация проточной части ЦСНД позволит снизить удельный расход теплоты на выработку электроэнергии паровой турбины ПТ-65/75-130/13, а также повысить надежность работы проточной части цилиндра среднего давления.

Для снижения удельного расхода теплоты на выработку электроэнергии путем увеличения пропускной способности части среднего давления цилиндра низкого давления предлагается заменить:

- Сопловой аппарат части среднего давления.
- Диафрагмы 19 – 26 ступеней на диафрагмы с увеличенной высотой направляющих лопаток.

- Комплекты облопачивания 18 – 26 ступеней на комплекты облопачивания с увеличенной высотой рабочих лопаток.

### ЗАМЕНА ПАРОТУРБИНОЙ УСТАНОВКИ НА ПАРОГАЗОВУЮ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ МОЩНОСТИ

Парогазовая установка – это установка, сочетающая в себе объединенные циклы паротурбинной и газотурбинной установок. При этом КПД такой установки значительно возрастает, если сравнивать его с «обычной» установкой [2].

Сжигание топлива происходит в топке котла, после которого продукты сгорания направляются в газовую турбину, которая вырабатывает мощность для привода компрессора и электрогенератора. Пар, полученный в котле, поступает в паровую турбину, где также установлен электрогенератор. После расширения пар конденсируется и поступает в парогенератор.

К преимуществам парогазовой установки можно отнести:

- Возможность достижения более высокого электрического КПД, по сравнению с паротурбинными и газотурбинными установками.
- Низкая стоимость единицы установленной мощности.
- Быстрый срок строительства.
- Меньший уровень загрязнения окружающей среды.
- К недостаткам парогазовых установок можно отнести:
  - Необходимость осуществление фильтрации воздуха от примесей.
  - Зависимость мощности от времени года (температуры атмосферного воздуха).
  - Ограничение по используемому топливу на станции [3].
  - Принципиальная тепловая схема ПГУ с КУ представлена на рис. 1, термодинамический цикл Брайтона-Ренкина – на рис. 2.

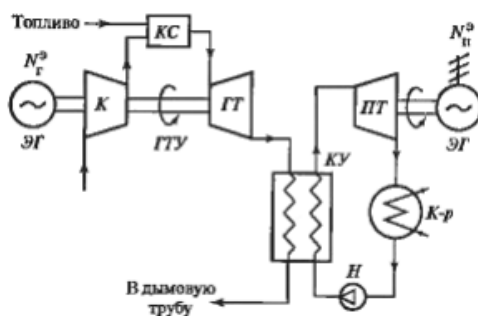


Рис. 1. Принципиальная тепловая схема ПГУ с котлом-утилизатором [3]:

ЭГ – электрогенератор, К – компрессор, ГТ – газовая турбина, КС – камера сгорания, ПТ – паровая турбина, КУ – котел-утилизатор, К-р – конденсатор, Н – насос

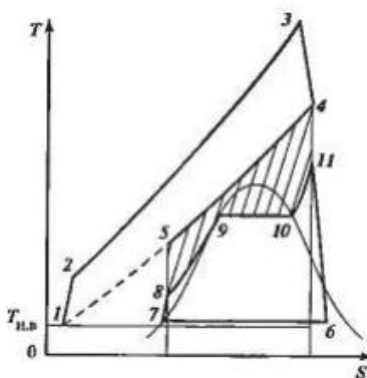


Рис. 2. Термодинамический цикл Брайтона-Ренкина [3]

Выходные газы газотурбинной установки поступают в котел-утилизатор, в котором значительная часть их теплоты передается рабочему телу паровой установки. Пар из КУ поступает

в паротурбинную установку, где он совершает полезную работу и конденсируется, конденсат при этом подается обратно в котел-утилизатор.

Схема генерации пара в КУ и Q,T-диаграмма процессов теплообмена в КУ представлена на рис. 3.

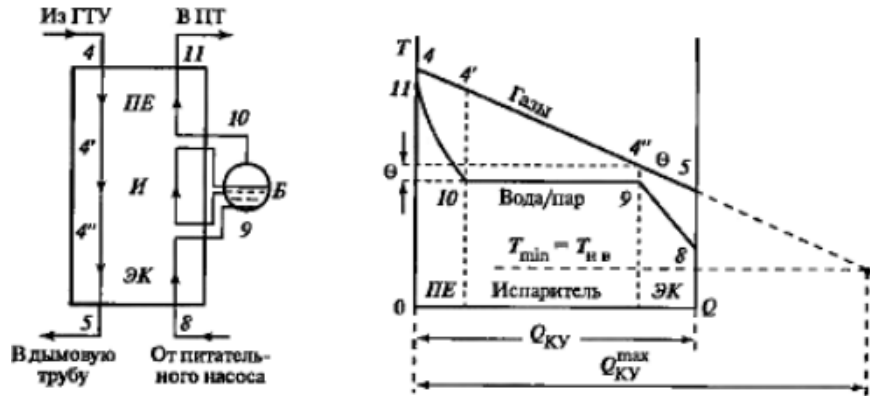


Рис. 3. Схема генерации пара в КУ и Q,T-диаграмма процессов теплообмена в КУ [3]  
 ПЕ – пароперегреватель, И – испаритель, ЭК – экономайзер, Б – барабан

Схема тепловых потоков ПГУ с КУ представлена на рис. 4.

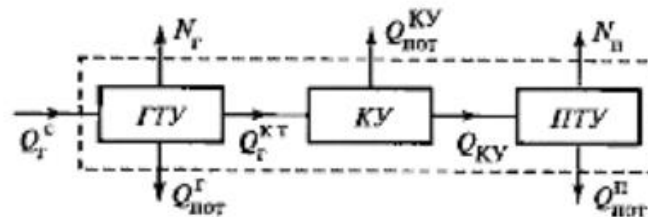


Рис. 4. Схема тепловых потоков ПГУ с котлом-утилизатором [3]:

$Q_{Г}^c$  – теплота сжигаемого топлива;  
 $Q_{КУ}$  – полезная тепловая нагрузка КУ;  
 $Q_{Г}^{KT}$  – теплота выходных газов ГТУ;  
 $Q_{пот}^Г, Q_{пот}^{КУ}, Q_{пот}^П$  – потери теплоты в ГТУ, в КУ, в ПТУ

Энергоблок состоит из газотурбинного контура с двухконтурным котлом-утилизатором и паротурбинного контура.

В газотурбинном контуре предусмотрена очистка воздуха перед подачей его в компрессор в комплексно-воздухоочистительном устройстве, а также дожигание уходящих газов ГТУ в камере дожигания для обеспечения необходимой температуры острого пара, подаваемого в цилиндр высокого давления паровой турбины. Сжигание топлива происходит в камере сгорания, привод электрогенератора расположен со стороны компрессора [2].

Генерация острого пара для паротурбинного контура осуществляется в котле-утилизаторе двух уровней давления: контуре высокого давления и контуре низкого давления, подогрев питательной воды осуществляется в газовом подогревателе конденсата.

Пар, полученный в контуре высокого давления котла-утилизатора, направляется в цилиндр высокого давления ПТ, а также на РОУ (№ 1 и № 2) для обеспечения теплового потребителя сетевой водой.

Пар совершает полезную работу в двух цилиндрах: высокого и низкого давлений. После ЦНД отработавший пар сбрасывается в конденсатор, куда также поступает выпар из деаэра-торов. Из водоводяного теплообменника в смеситель-1 поступает химически очищенная вода

из химводоочистки [4].

Пар из уплотнений турбины направляется в подогреватель уплотнений, охладитель эжекторов и сальниковый подогреватель для подогрева конденсатной воды, поступающей из СМ-1. После ЭУ, ПУ и ПС часть конденсата направляется в деаэрактор питательной воды, а часть – в ГПК.

Деаэрактор питательной воды обеспечивается греющим паром из контура низкого давления двухконтурного котла-утилизатора, паром из уплотнений штоков, а также паром из расширителя продувки 1-й ступени.

Из ДПВ питательная вода при помощи двух питательных насосов двух уровней давления (высокого и низкого) направляется в двухконтурный котел-утилизатор.

Посредством ПН НД питательная вода отправляется в барабан НД откуда питательная вода направляется в испаритель НД для генерации пара НД. После ИСП НД смесь воды и пара направляется БНД, где происходит сепарация воды и пара. Пар поступает в перегреватель НД, где происходит перегрев пара и последующая подача его в деаэракторы.

Посредством ПН ВД питательная вода направляется в экономайзер ВД. После дополнительного подогрева питательной воды она поступает в БВД, далее в ИСП ВД для генерации пара, после чего – в БВД для сепарации воды и пара, далее в ПЕ ВД для перегрева пара ВД. Перегретый пар ВД подается через главную паровую задвижку в ЦВД и РОУ.

Часть воды из БВД направляется в расширитель продувки 1-й ступени для организации процесса продувки соленых отсеков. Дренаж из расширителя продувки 1-й ступени направляется во 2-ю ступень расширителя продувки. Дренаж расширителя продувки 2-й ступени направляется в ВВТ, куда также поступает дренаж из сетевых подогревателей, для подогрева сырой воды. Подогретый сырую воду дренаж направляется в СМ-1, установленный за конденсатором. Пар из расширителя второй продувки направляется в деаэрактор добавочной воды [4].

Добавочная вода после ВВТ направляется в химводоочистку, а после – в деаэрактор добавочной воды. Из деаэратора добавочной воды часть потока обеспечивает подпитку сетевого контура, а другая часть – подпитку основного контура через СМ-2 для восполнения потерь воды [5].

Подпиточная вода сетевого контура направляется в СМ-3, установленный перед нижним сетевым подогревателем (ПСГ-1). После сетевых подогревателей установлен пиковый водогрейный котел для покрытия пиков теплофикационной нагрузки [4].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье представлен план по модернизации Уфимской ТЭЦ-2 в связи со снижением уровня потребления пара промышленными потребителями до низких значений, что оказывает негативное влияние на условия работы паровых турбин с промышленным и теплофикационным отбором ПТ-65/75-130/13.

Выполнен обзор предлагаемых технических решений, которые будут использованы в работе для поиска наиболее оптимального из них, способного обеспечить наиболее экономичную работу теплоэлектроцентрали. Были определены соответствующие проблемы, возникающие при эксплуатации паротурбинных установок.

Также было отмечено влияние соответствующей модернизации на технико-экономические показатели Уфимской ТЭЦ-2. Среди них можно выделить: снижение удельного расхода теплоты на выработку электроэнергии, качество и надежность работы оборудования после проведения модернизации, а также экономичность по сравнению с режимом работы паротурбинных установок до модернизации.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трухний А.Д., Ломакин Б.В. Теплофикационные паровые турбины и турбоустановки: Учебное пособие для вузов. М.: Изд-во МЭИ, 2002. 540 с.: ил., вкладки.

2. Газотурбинная электростанция // Большая советская энциклопедия: [в 30 т.] / гл. ред. А. М. Прохоров. 3-е изд. М.: Советская энциклопедия, 1969—1978.
3. Цанев С.В. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций / С. В. Цанев, В. Д. Буров, А. Н. Ремезов; под ред. С. В. Цанева. М.: Изд-во МЭИ, 2002.
4. РД 153-34.1-30.737-97 - Типовая энергетическая характеристика турбоагрегата ПТ-65/75-130/13.
5. Инструкция по эксплуатации турбины ПТ-65/75-130/13 ст. № 4 ИЭ-14.03-03.

#### ОБ АВТОРАХ

**БУДНИКОВ Арсений Александрович**, дипл. 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» (УГАТУ, 2022).

#### METADATA

**Title:** Исследование способов повышения эффективности работы ТЭЦ-2 при снижении уровня потребления пара из производственного отбора промышленным потребителем

**Affiliation:** Ufa University of Science and Technology (UUST), Russia.

**Email:** <sup>1</sup> arsenybudnikov@gmail.com

**Language:** Russian.

**Source:** Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa University of Science and Technology), no. 2 (28), pp. 48-54, 2023. ISSN 2225-9309 (Print).

**Abstract:** Within the framework of the previously developed heat and power scheme of the Ufa TETs-2 heat and power plant, this work considers the possibility of increasing the efficiency of its operation by modernizing the steam turbine PT-65/75-130/13 due to the cessation of steam consumption of production samples of production turbines PT-65/75-130/13 No. 4 and 5 of the Ufa TETs-2, with the exception of site No. 1 of PJSC UMPO. The proposed methods of modernization of the thermal power plant are designed to increase the technical and economic performance of the thermal power plant, to ensure the improvement of the reliability of steam turbine plants during the operation of the equip

**Key words:** Heat and Power Plant, technical and economic indicators, reliability, steam turbine plants, gas turbine plants, steam-gasstations, Brighton-Rankin cycle, throughput capacity.

**About authors:**

**Butorin Akim Vitalievich**, Diploma 13.03.01 "Heat Energy and Heat Engineering" (UGATU, 2022).