



DOI 10.22363/2312-8143-2020-21-1-27-35

УДК 557.4.621.039.584

Научная статья

## Моделирование эффективного решения утилизации вторичных энергоресурсов ПГУ на примере ПГУ-420Т

Ю.А. Антипов, И.К. Шаталов, К.В. Шкарин, А.С. Барыбина, Я.А. Огнева, П.Д. Морозов

Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6

### История статьи:

Поступила в редакцию: 13 апреля 2020 г.

Доработана: 24 мая 2020 г.

Принята к публикации: 3 июня 2020 г.

### Ключевые слова:

теплонасосная установка, парогазотурбинная установка, утилизация, вторичные энергоресурсы, энергетическая эффективность, моделирование

В настоящее время большое внимание уделяется повышению эффективности работы энергетических установок путем использования вторичных энергоресурсов (ВЭР). В качестве базовой энергетической установки рассмотрен энергоблок ПГУ-420Т, где отвод тепла от основного и вспомогательного оборудования происходит в охладителях и направляется в систему циркуляционного водоснабжения через теплообменники замкнутого контура (ТЗК). В результате переданное тепло в количестве  $Q_{\text{ТЗК}} \approx 6,4$  МВт утилизируется через градирню в окружающую среду. Предложено моделирование эффективного решения способа утилизации тепла замкнутого контура посредством применения многоступенчатой парокompрессионной теплонасосной установки (ТНУ). Кроме того, проведен расчет эффективности использования ВЭР в зависимости от количества ступеней ТНУ. Рассматривались несколько вариантов модели, например с двух-, трех- и четырехступенчатой ТНУ, были получены коэффициенты преобразования. Более того, установлены необходимые мощности для каждого варианта модели. Наконец, обсуждены экономические преимущества использования многоступенчатой ТНУ вместо традиционной одноступенчатой в течение годовой эксплуатации энергоблока ПГУ-420Т.

### Введение

В последние годы в России появилась тенденция замены в теплоэлектроцентралях (ТЭЦ) паро-

турбинных установок (ПГУ) с термическим КПД 45–48 % на современные энергоблоки, работающие по парогазовому циклу с термическим КПД 54–58 %. Только в Москве в период 2014–2015 гг. были введены в строй два энергоблока ПГУ-420Т и один – ПГУ-220Т [1; 2]. Несмотря на высокий КПД вновь установленных энергоблоков, имеют место потери тепловой энергии от работающих агрегатов, которые из-за низкого энергетического потенциала не используются в виде вторичного энергетического ресурса (ВЭР) [3], например дополнительного подогрева сетевой воды, а сбрасывается в окружающую среду.

Так, в работающей парогазотурбинной установке (ПГУ) ВЭР можно разделить следующим образом: 1) уходящие дымовые газы на выходе из котла-утилизатора (КУ); 2) тепло, отводимое от маслоохладителей турбин, трансформаторов и гидромурфт насосов; 3) тепло, отводимое от газо-

*Антипов Юрий Александрович*, доцент департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии РУДН, кандидат технических наук, доцент, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-5598-7522>, [rudn-tit@yandex.ru](mailto:rudn-tit@yandex.ru)

*Шаталов Иван Касьянович*, доцент департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии РУДН, кандидат технических наук, профессор, доцент, eLIBRARY SPIN-код: 1624-5017, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-3781-3788>

*Шкарин Кирилл Владимирович*, ассистент департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии РУДН, eLIBRARY SPIN-код: 4599-9150, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-5680-517X>

*Барыбина Анна Сергеевна*, студентка 2-го курса по направлению «Энергетическое машиностроение» департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии РУДН.

*Огнева Яна Александровна*, студентка 2-го курса по направлению «Энергетическое машиностроение» департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии РУДН.

*Морозов Павел Дмитриевич*, студент 2-го курса по направлению «Энергетическое машиностроение» департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии РУДН.

© Антипов Ю.А., Шаталов И.К., Шкарин К.В., Барыбина А.С., Огнева Я.А., Морозов П.Д., 2020



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License  
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

охлаждателей турбогенераторов; 4) тепло, отводимое от охлаждателей грязного конденсата, вакуумных установок и пробоотборных точек; 5) тепло, отводимое от конденсатора пара уплотнений (КПУ); 6) тепло, отводимое от конденсатора ПТУ. Каждый из видов ВЭР имеет различную долю тепловой энергии в тепловом балансе ПГУ и различные методы реализации их использования в повышении эффективности работы ПГУ [4; 5].

К примеру, был предложен проект утилизации сбросной теплоты паровой турбины Ленинградской АЭС-2 при помощи теплового насоса ТНСО2-2300 для подогрева сетевой воды с 28 до 80 °С, где коэффициент преобразования (COP) равен 5 [6; 7]. Уникальность проекта заключается в том, что для подпитки сетевой воды используют напрямую воду Ладожского озера, обладающую свойствами мягкой воды, пригодной для подогревателей сетевой воды. По проекту предполагалось прямую ветку сетевой воды с температурой 80 °С направить от Ленинградской АЭС-2 в Санкт-Петербург. Обратная ветка сетевой воды в этой схеме не предусмотрена, что и создает условия высокой рентабельности работы АЭС-2 в теплофикационном режиме. Однако опасения, что поступающая от АЭС-2 сетевая вода может содержать несколько повышенный фон излучения относительно фона окружающей среды, послужили одним из оснований не дать проекту воплотиться в жизнь.

Другим направлением поиска эффективного решения утилизации вторичных энергоресурсов стала разработка новой концепции использования теплораспределительных узлов [8]. Концепция основана на прокладке уличных магистралей, которые содержат две одиночные, одну двойную и одну тройную трубы. Такое разветвление создает подсеть с различными параметрами нагрева сетевой воды, где температура для сети специально оптимизирована по следующим параметрам: 1) потребление тепловой энергии; 2) коэффициент тепловых потерь; 3) начальные параметры в теплораспределительных узлах. Таким образом, была смоделирована сеть, основные узлы которой имели низкую рабочую температуру, что приведет к снижению потерь тепла.

Еще одно направление эффективного решения утилизации вторичных энергоресурсов предложено в работах [9–11], где рассматривается возможность повысить эффективность паротурбинной электростанции за счет использования солнечной

энергии. Благодаря размещению определенным образом зеркал, отраженные от них лучи фокусируются на поверхности дополнительного парогенератора, что позволяет существенно снизить удельный расход органического топлива.

В настоящее время во всем мире наметилась тенденция интенсивного использования альтернативных источников энергии, что породило дополнительные организационные проблемы: финансовые, нормативные и информационные. Чтобы как-то решить эти проблемы, была создана методология внедрения стандартов эффективности электростанций для выработки электроэнергии и сокращения потенциальных выбросов в окружающую среду [12; 13].

Таким образом, целью исследования является моделирование эффективного решения использования ВЭР в работе ПГУ.

## 1. Расчетные исследования. Предмет исследования

Рассмотрим в качестве примера энергоблок ПГУ-420Т «Мосэнерго», который был введен в эксплуатацию в декабре 2014 г. Это моноблок, в состав которого входят ГТУ SGT5-4000F и ПТУ SST-5000 производства Siemens, котел-утилизатор ЭМА-024КУ завода «Красный котельщик». ВЭР этого энергоблока представлены в табл. 1, из которой видно, что максимальная тепловая энергия ВЭР приходится на уходящие дымовые газы. Однако использование ВЭР от дымовых газов в настоящее время сопряжено с повышенным риском интенсивной коррозии теплообменных аппаратов (ТА) в зоне температур ниже 105 °С, где создаются благоприятные условия образования паров серной кислоты, взаимодействующие с металлом ТА.

В энергоблоке ПГУ-420Т в целях отвода тепловой энергии была применена схема замкнутого контура охлаждения оборудования (рис. 1). Отвод тепла от основного и вспомогательного оборудования происходит в охладителях, где охлаждающей средой является обессоленная вода замкнутого контура охлаждения. Система замкнутого контура охлаждения отводит все тепло, вырабатываемое оборудованием, в систему циркуляционного водоснабжения в теплообменниках замкнутого контура (ТЗК) [14].

В результате переданное тепло в количестве  $Q_{ТЗК} \approx 6,4$  МВт утилизируется через градирню в

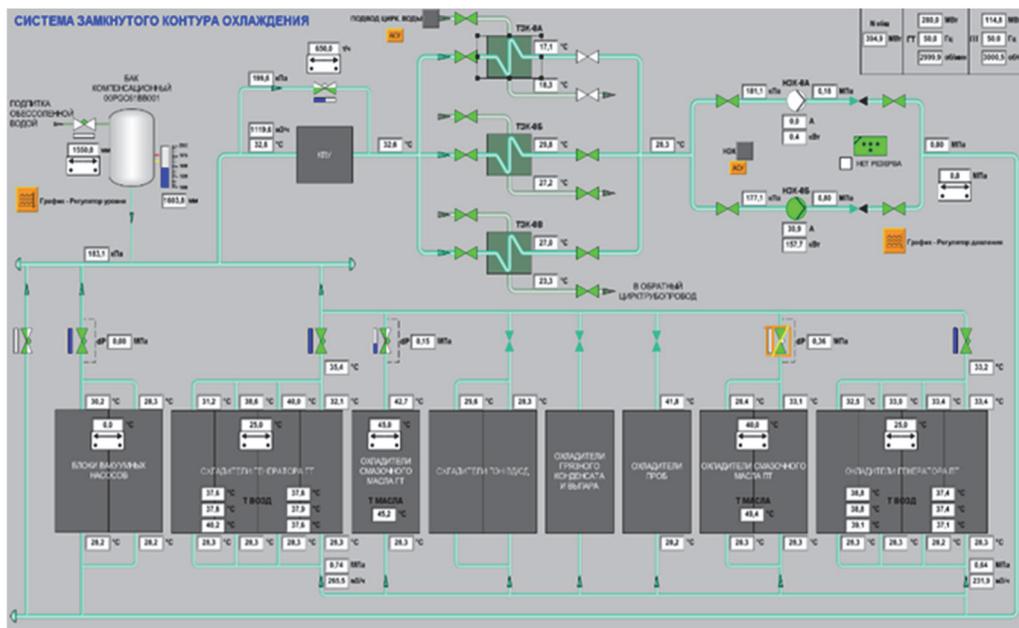
окружающую среду. Такой способ утилизации низкопотенциальной тепловой энергии приводит не только к снижению КПД энергоблока, но и к тепловому загрязнению окружающей среды. Поэтому напрашивается идея в тепловой схеме замкнуто-

го контура охлаждения оборудования заменить ТЗК на компрессионную теплонасосную установку (ТНУ), при помощи которой можно будет преобразовать низкопотенциальную тепловую энергию в высокопотенциальную.

Таблица 1

**ВЭР энергоблока**  
 [Table 1. The secondary energy resources of the energy block]

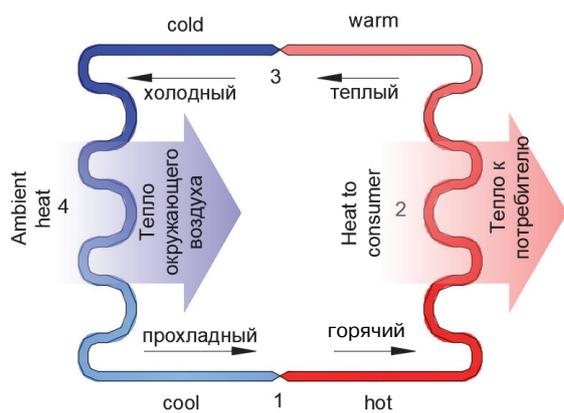
| ВЭР ПГУ [Secondary energy resources of the CCGT]  | Температура T, °C [Temperature T, °C] | Q, МВт [MW] |
|---|---------------------------------------|-------------|
| Дымовые газы после КУ<br>[Flue gases after the waste heat recovery unit]  | 110                                   | 37          |
| Охлаждающая вода после газоохладителя генератора ПТУ<br>[Cooling water after the gas coolers of the steam turbine unit]             | 40                                    | 1,29        |
| Охлаждающая вода после газоохладителя генератора ГТУ<br>[Cooling water after the gas coolers of the gas turbine unit]               | 46                                    | 2,63        |
| Охлаждающая вода после маслоохладителя ПТУ<br>[Cooling water after the oil coolers of the steam turbine unit]                       | 40                                    | 0,88        |
| Охлаждающая вода после маслоохладителя ГТУ<br>[Cooling water after the oil coolers of the gas turbine unit]                         | 43                                    | 1,47        |
| Охлаждающая вода после маслоохладителя гидромуфт<br>[Cooling water after the oil coolers of the hydraulic couplings]                | 36                                    | 0,36        |
| Охлаждающая вода после охладителей грязного конденсата и выпара<br>[Cooling water after the coolers of dirty condensate and vapor ] | 35                                    | 0,15        |
| Охлаждающая вода после охладителей вакуумных насосов<br>[Cooling water after the coolers of vacuum pumps ]                          | 36                                    | 0,18        |



**Рис. 1.** Схема замкнутого контура охлаждения оборудования  
 [Figure 1. Closed circuit diagram of the cooling equipment]

## 2. Особенности работы многоступенчатого ТНУ в тепловой схеме энергоблока ПГУ-420Т

Основополагающим принципом работы ТНУ является использование механической работы для перемещения тепла из области низкопотенциального источника тепла (НПИТ) в область высокопотенциального источника тепла (ВПИТ). На рис. 2 изображены основные компоненты ТНУ: компрессор (1), конденсатор (2), редуктор (3) и испаритель (4). Компрессор повышает давление хладагента и, следовательно, его температуру, тем самым перемещая тепло из области НПИТ в область ВПИТ. При этом агрегатное состояние хладагента должно находиться в паровой фазе.



**Рис. 2.** Основные компоненты ТНУ  
[Figure 2. The main components of a heat pump]

Конденсатор, представляющий собой рекуперативный теплообменник, отдает тепло хладагента потребителю в основном за счет фазового перехода последнего из парового состояния в жидкость. Редуктор необходим для понижения давления хладагента. При этом жидкая фаза хладагента переходит в состояние пара. Процесс этот протекает в испарителе, где тепло переходит от НПИТ к хладагенту. Испаритель конструктивно выполнен в виде рекуперативного теплообменника.

Термодинамика идеального цикла работы ТНУ представлена в виде диаграммы на рис. 3, который показывает изменение температуры и энтропии во время прохождения этого цикла. Диаграмма относительно колоколообразной кривой разбита на три области. В левой области относительно кривой хладагент находится в состоянии жидкой фазы. В правой области относительно этой кри-

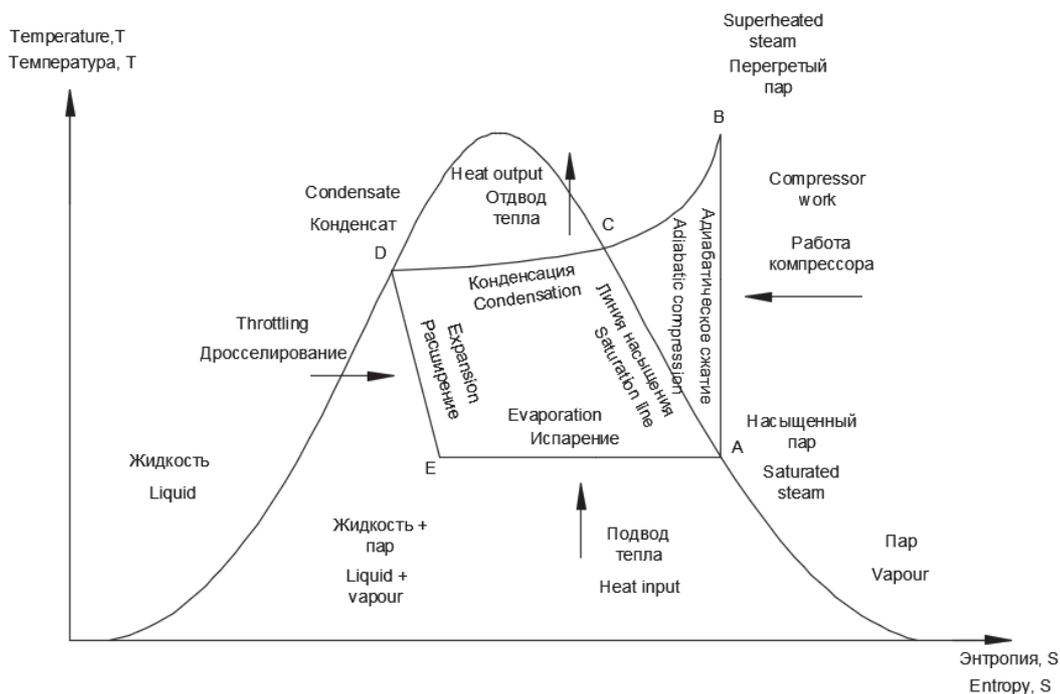
вой хладагент находится в перегретом состоянии паровой фазы. В области под колоколообразной кривой хладагент находится в состоянии влажного пара, причем, количество доли жидкой фазы хладагента в направлении от левой стороны кривой к правой уменьшается по отношению доли паровой фазы от 1 до 0.

Идеальный цикл работы ТНУ на диаграмме изображен в виде замкнутого контура ABCDEA. Линия АВ отображает процесс адиабатного сжатия хладагента в компрессоре. Линия ВС отображает изобарный процесс охлаждения хладагента от перегретого состояния до состояния насыщения паров (С). Линия CD отображает процесс изотермического отвода теплоты от хладагента к потребителю за счет внутренней теплоты парообразования хладагента при переходе от состояния паровой фазы в состояние жидкой фазы. Линия DE отображает процесс дросселирования хладагента от давления хладагента в конденсаторе до давления в испарителе. Линия EA отображает процесс изотермического подвода теплоты от НПИТ к хладагенту за счет внутренней теплоты парообразования хладагента при переходе от состояния жидкой фазы в состояние паровой фазы.

Экономическая эффективность ТНУ определяется коэффициентом преобразования теплоты COP, равным отношению количества теплоты, переданной от НПИТ к ВПИТ, к работе, затраченной компрессором для нагнетания хладагента от НПИТ к ВПИТ.

Величина COP сильно зависит от разности температур между ВПИТ и НПИТ. Так, с увеличением этой разности COP будет падать. На величину COP также влияет химический состав хладагента. Например, у хладагента R-600a линия насыщенных паров лежит практически близко к адиабате АВ по сравнению, скажем, с хладагентом R-717, где градиент линии насыщения имеет отрицательное значение. Следовательно, работа сжатия по адиабате хладагента R-717 будет значительно больше по сравнению с работой сжатия хладагента R-600a при подъеме температуры хладагентов на одну и ту же величину, что приведет к снижению COP.

Все эти особенности работы ТНУ влекут определенные трудности в моделировании эффективно-го решения утилизации вторичных энергоресурсов ПГУ. Частично удалось решить данную проблему заменой одноступенчатой ТНУ на многоступенчатую, применяя технические решения, изложенные в работе [15].



**Рис. 3.** T–S диаграмма термодинамического идеального цикла работы ТНУ  
**[Figure 3.** T–S diagram of the thermodynamic cycle of a heat pump]

Таким образом, при замене ТЗК на ТНУ в роли потребителя может выступать как сырая вода, которую необходимо подогреть перед подачей на установки водоподготовки, так и обратная сетевая вода (ОСВ). Сетевая вода необходима для подачи горячей воды по прямой ветке сетевой воды (ПСВ) для нужд жилищно-коммунального хозяйства. В зависимости от климата, размера и величин тепловых мощностей веток сетевой воды температура ОСВ может варьировать в широком диапазоне.

### 3. Результаты расчета

Рассмотрим варианты моделирования эффективного решения подогрева обратной сетевой воды. Пусть температура обратной сетевой воды, которую необходимо подогреть до 75 °С, при самых неблагоприятных условиях будет равна 32,6 °С. С помощью одноступенчатой ТНУ утилизируем ВЭР в количестве  $Q_{\text{тзк}} \approx 5,6$  МВт, направленный на подогрев обратной сетевой воды, по схеме, представленной на рис. 4.

Согласно выполненным расчетам в программе CoolPack и методикам [16; 17], используя в качестве рабочего тела хладагент R600a, коэффи-

циент преобразования COP для схемы с одноступенчатой ТНУ будет равен 6,82. Заменяем в тепловой схеме одноступенчатую ТНУ на двух-, трех- и четырехступенчатые. В качестве примера рассмотрим принцип работы трехступенчатой ТНУ (рис. 5), содержащей испаритель 1, три компрессора 3, 13 и 22, три конденсатора 4, 14 и 23, разделители жидкой и паровой фазы хладагента 7 и 17, переохладители жидкой фазы хладагента 8, 18 и 26 и редукторы 29, 30 и 31.

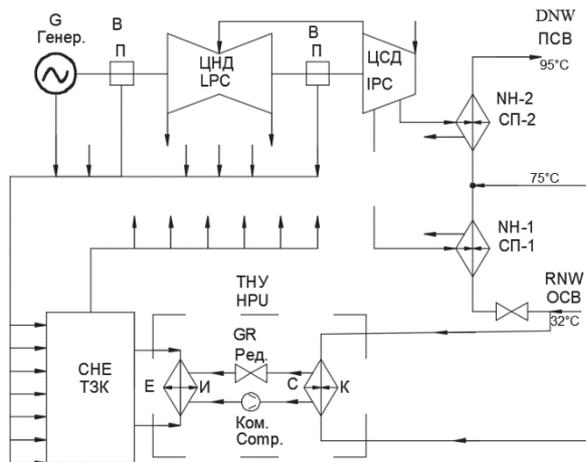
Хладагент из испарителя 1 поступает на вход компрессора 3. За компрессором сжатый хладагент поступает в полость 5 конденсатора 4, где происходит отбор теплоты через рекуперативный теплообменник 6. При этом за счет внутренней теплоты фазового перехода хладагента нагревается ОСВ до температуры насыщенных паров хладагента. Далее в разделительной колонке 7 жидкая фаза хладагента поступает в переохладитель 8, а паровая фаза хладагента поступает на вход второй ступени компрессора 13.

Жидкая фаза хладагента на выходе из переохладителя 8, проходя через редуктор 29, дросселируется до давления, равного давлению паровой фазы хладагента на входе в компрессор 3. При этом в испарителе 1 из-за низкого давления

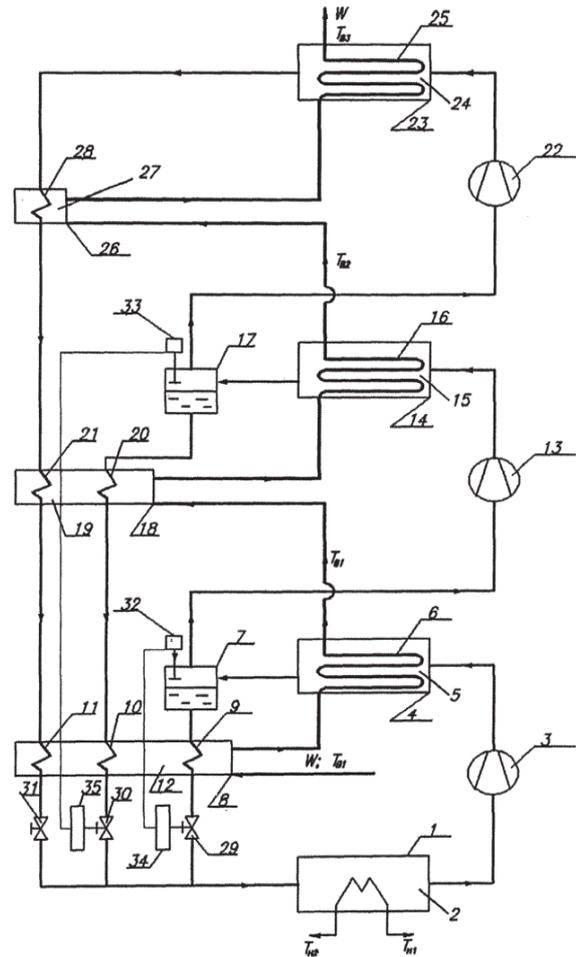
жидкая фаза хладагента испаряется, в следствии чего теплота от ОСВ идет на образование паровой фазы хладагента. Аналогично первой ступени процесс нагрева ОСВ происходит на второй и третьей ступенях.

В схеме трехступенчатой ТНУ дополнительно размещены два регулятора уровня жидкой фазы хладагента в разделительных колонках 7 и 17, которые кинематически связаны с редукторами 28 и 32 соответственно. Такое выполнение регулирующего устройства позволяет избежать переполнения разделительных колонок жидкой фазой хладагента и попадания его на вход компрессоров 13 и 22. Так как в ТНУ обычно применяют поршневые компрессоры, то попадание жидкой фазы хладагента в рабочий цилиндр приведет к гидравлическому удару и разрушению поршневой группы. С другой стороны, снижение уровня жидкой фазы хладагента ниже предельно минимального может привести к срыву работы испарителя.

Таким образом, нагрев ОСВ происходит ступенчато, последовательно в переохладителях и конденсаторах каждой ступени соответственно. Такой ступенчатый нагрев ОСВ обеспечивает высокий COP по сравнению с одноступенчатой ТНУ.



**Рис. 4.** Фрагмент схемы системы замкнутого контура охлаждения оборудования ПГУ-420Т с подключенной ТНУ: ТЗК – теплообменник замкнутого контура; ЦНД – цилиндр низкого давления; ЦСД – цилиндр среднего давления; П – подшипник; Генер. – генератор; СП-1 и СП-2 – сетевые подогреватели; ОСВ – обратная сетевая вода; ПСВ – прямая сетевая вода; И – испаритель; К – конденсатор; Ред. – редуктор; Ком. – компрессор  
**[Figure 4.** Fragment of the closed circuit cooling system scheme of the CCGT-420T with an operating heat pump unit (HPU); SHE – closed-circuit heat exchangers; LPC – low pressure cylinder; IPC – intermediate pressure cylinder; B – bearing; G – generator; NH-1 and NH-2 – network heaters; DNW – direct network water; RNW – reverse network water; E – evaporator; C – condenser; GR – gear reducer; Comp. – compressor]



**Рис. 5.** Принципиальная схема модели трехступенчатой теплонасосной установки  
**[Figure 5.** Schematic diagram of a two-stage heat pump unit model]

Как показали расчеты, применение в вышеуказанной модели вариантов с двух-, трех- и четырехступенчатой ТНУ, позволило получить COP, равные 9,37; 9,85 и 10,43 соответственно. Таким образом, утилизация ВЭР с тепловой производительностью  $Q_{\text{ТЗК}} \approx 5,6$  МВт для одноступенчатой ТНУ потребует компрессор мощностью  $W_1 = 821$  кВт; для двухступенчатой ТНУ –  $W_2 = 597$  кВт; для трехступенчатой ТНУ –  $W_3 = 567$  кВт; для четырехступенчатой ТНУ –  $W_4 = 540$  кВт, что по отношению к одноступенчатой ТНУ составляет выигрыш двухступенчатой ТНУ в 27,2 %; двухступенчатой ТНУ – в 30,7 %; трехступенчатой ТНУ – в 34,6 %.

Результаты расчетов приведены в табл. 2. Следует отметить, что стоимость многоступенчатой ТНУ на единицу мощности в первом приближении не сильно отличается от одноступен-

чатой ТНУ, так как на единицу тепловой мощности ТНУ будет приходиться практически такие же трудозатраты и материалоемкости, что и в многоступенчатой ТНУ.

Подчеркнем также, что в случае применения предложенной модели эффективного решения использования ВЭР в энергоблоках мощностью свы-

ше 250 МВт, компрессоры необходимо выполнять в виде одновального многоступенчатого центробежного компрессора с промежуточными отборами хладагента и конденсаторами, расположенными непосредственно на корпусе компрессора. Такая компоновка ТНУ обеспечит низкую удельную металлоемкость на единицу мощности.

Таблица 2

Результаты расчета  
[Table 2. Calculation results]

| Количество ступней ТНУ<br>[The number of stages in the HPU]  | Одноступенчатая<br>ТНУ<br>[One-stage HPU] | Двухступенчатая<br>ТНУ<br>[Two-stage HPU] | Трехступенчатая<br>ТНУ<br>[Three-stage HPU] | Четырехступенчатая<br>ТНУ<br>[Four-stage HPU] |
|--|---|---|---|---|
| Мощность компрессора $W_n$ , кВт<br>[Compressor power $W_n$ , kW]  | 821                                       | 597                                       | 567   | 540   |
| $W_1 - W_n$ , кВт [kW]   | 0   | 244                                       | 254   | 281   |
| Экономия количества условного топлива за час*, т у. т./ч<br>[Equivalent fuel saved per hour, ton $f_e$ /hour]  | 0   | 0,030                                     | 0,0312                                      | 0,0346  |
| Экономия количества условного топлива за год, т у. т./год<br>[Equivalent fuel saved per year, ton $f_e$ /year]   | 0   | 262,08                                    | 272,56                                      | 302,26  |
| Экономия в рублях применения многоступенчатого ТНУ по отношению к одноступенчатому**, руб./год<br>[Savings in rubles applying multi-stage heat pump with respect to the single-stage, rubles/year] | 0   | 3606000                                   | 3750000                                     | 4159000                                       |

Примечания. \* 1000 кВт/ч = 0,123 т у. т. \*\* 1 т у. т. = 215 долл. США = 13 760 руб.  
[Notes. \* 1000 kW/h = 0.123  $f_e$ . \*\* 1 ton  $f_e$  = 215 USA dollars = 13 760 rubles.]

## Заключение

Заменив в модели схемы пластинчатый ТЗК на испаритель ТНУ, можно направить это тепло на испарение хладагента. В конденсаторе осуществляется подогрев либо сырой воды, либо обратной сетевой воды. В первом случае результатом является экономия греющего пара, который в данный момент используется для подогрева сырой воды. Во втором случае результатом станет повышение температуры сетевой воды перед блочной теплофикационной установкой и, как следствие, повышение ее экономичности.

Применение многоступенчатой ТНУ можно использовать для подогрева как сырой, так и обратной сетевой воды одновременно. При этом замена одноступенчатой ТНУ, допустим, на четырехступенчатую позволит в течение годовой эксплуатации энергоблока ПГУ-420Т сэкономить 4 159 000 рублей.

## Список литературы

1. История парогазового цикла в России. URL: <http://www.combienergy.ru/stat/900-Istoriya-parogazovogo-cikla-v-Rossii-Perspektivy-razvitiya> (дата обращения: 25.05.2020 г.).
2. Современная теплоэнергетика. URL: [https://ozlib.com/857603/tehnika/sovremennaya\\_teploenergetika](https://ozlib.com/857603/tehnika/sovremennaya_teploenergetika) (дата обращения: 25.05.2020 г.).
3. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: федеральный закон от 23 ноября 2009 г. № 261-ФЗ.
4. Мацевитый Ю.М., Чиркин Н.Б., Клепанда А.С. Об использовании тепловых насосов в мире и что тормозит их широкомасштабное внедрение в Украине // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. 2014. № 2. С. 2–17.
5. Молодкина М.А. Повышение технико-экономических показателей парогазовых тепловых электростанций путем утилизации низкопотенциальной теплоты с использованием тепловых насосов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2012. 16 с.

6. Проценко В.П., Пустовалов С.Б., Савицкий А.И., Легуенко С.К. Атомно-теплонасосная теплофикация как новое направление в развитии энергетики // Энерго-снабжение и водоподготовка. 2010. № 1. С. 25–29.

7. Чиркин Н.Б., Кузнецов М.А., Шерстов Е.В., Стенников В.Н. Потенциальная возможность и техническая рациональность применения теплонасосных технологий при комбинированном производстве электрической и тепловой энергии // Теплопередача в машиностроительных конструкциях. Проблемы машиностроения. 2014. Т. 17. № 1. С. 11–20.

8. Stanislav C. Low-temperature district heating distributed from transmission-distribution junctions to users: energy and environmental modelling // *Energy Procedia*. 2018. Vol. 147. Pp. 382–389.

9. Razin A., Mutasim B., Hossain M. Increasing the Efficiency of Steam Power Plant with the Help of Solar Energy // *Proceedings of International Conference in Developments in Renewable Energy Technology*. Dhaka, Bangladesh, 2012.

10. Le Ray G., Christensen M.H., Pinson P. Detection and Characterization of Domestic Heat Pumps // *IEEE PowerTech Conference*. Milan, Italy, 2019.

11. Czapnik M., Tylman M., Jaskulski M., Wawrzyniak P. Heat recovery with chemical heat pump // *Journal Chemical and Process Engineering*. 2019. Vol. 40. Pp. 273–279.

12. Mahlia T.M., Lim J.Y., Aditya L. Methodology for implementing power plant efficiency standards for power generation: potential emission reduction // *Clean Technology Environment Policy*. 2018. Vol. 20. Pp. 309–327.

13. Lopatin E. Cost of Heating Pump Systems in Russia // *International Journal of Energy Economics and Policy*. 2020. Vol. 10. Pp. 219–223.

14. Шаталов И.К., Антипов Ю.А., Собенников Е.В., Камбиз С.В. Многоступенчатая теплонасосная установка повышенной эффективности // *Инженерные системы – 2015: сборник трудов VIII Международной научно-практической конференции* / под ред. Н.К. Пономарева. М.: РУДН, 2015. С. 541–546.

15. Staffell I., Brett D., Brandon N., Hawkes A. A review of domestic heat pumps // *Energy & Environmental Science*. 2012. Vol. 5. Pp. 9291–9306.

16. Патент на полезную модель 140197 РФ, МПК F25B30/00. Многоступенчатая теплонасосная установка / Ю.А. Антипов, И.К. Шаталов, Е.В. Собенников; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Российский университет дружбы народов». № 2013117874/06; заявл. 18.04.2013; опубл. 10.05.2014.

17. Патент на изобретение 2705696 РФ, МПК F25B30/00, F25B1/10. Многоступенчатая теплонасосная установка / Ю.А. Антипов, И.К. Шаталов, А.В. Силин, К.В. Шкарин, Е.В. Собенников; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Российский университет дружбы народов». № 2017102563; заявл. 26.01.2017; опубл. 25.01.2018.

#### Для цитирования

Антипов Ю.А., Шаталов И.К., Шкарин К.В., Барыбина А.С., Огнева Я.А., Морозов П.Д. Моделирование эффективного решения утилизации вторичных энергоресурсов ПГУ на примере ПГУ-420Т // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования*. 2020. Т. 21. № 1. С. 27–35. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-1-27-35>

DOI 10.22363/2312-8143-2020-21-1-27-35

Research paper

## Modeling an effective method to utilize secondary energy resources of a combined cycle gas turbine based on the CCGT-420T

Yuri A. Antipov, Ivan K. Shatalov, Kirill V. Shkarin, Anna S. Barybina, Yana A. Ogneva, Pavel D. Morozov

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation

#### Article history:

Received: April 13, 2020

Revised: May 24, 2020

Accepted: June 3, 2020

Nowadays, improving the efficiency of power plants by utilizing secondary energy resources is gaining more attention in the energy sector. In this paper, the combined cycle gas turbine (CCGT-420T) was considered, where exhaust heat from the main and auxiliary equipment is utilized, and sent to a water supply system through a closed-circuit heat exchanger, as a result, the heat transferred ( $Q \approx 6.4$  MW) is rejected into the environment through a cooling tower. Moreover, an effective modelling method for utilizing heat in a closed cycle, using a steam compressing heat pump unit (HPU) is proposed. In addition,

Yuri A. Antipov, Associate Professor at the Department of Mechanical and Instrumental Engineering of Engineering Academy of RUDN University, Ph.D., ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-5598-7522>, [rudn-tit@yandex.ru](mailto:rudn-tit@yandex.ru)

Ivan K. Shatalov, Professor at the Department of Mechanical and Instrumental Engineering of Engineering Academy of RUDN University, Ph.D., eLIBRARY SPIN-code: 1624-5017, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-3781-3788>

Kirill V. Shkarin, Assistant at the Department of Mechanical and Instrumental Engineering of Engineering Academy of RUDN University, eLIBRARY SPIN-code: 4599-9150, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-5680-517X>

Anna S. Barybina, 2<sup>nd</sup> year master student in the field of "Power Engineering" at the Department of Mechanical and Instrumental Engineering of Engineering Academy of RUDN University.

Yana A. Ogneva, 2<sup>nd</sup> year master student in the field of "Power Engineering" at the Department of Mechanical and Instrumental Engineering of Engineering Academy of RUDN University.

Pavel D. Morozov, 2<sup>nd</sup> year master student in the field of "Power Engineering" at the Department of Mechanical and Instrumental Engineering of Engineering Academy of RUDN University.

**Keywords:**

heat pump units, HPU, combined cycle gas turbine, CCGT, utilization, secondary energy resources, energy efficiency, modeling

a calculation of the effectiveness of utilizing secondary energy resources depending on the number of HPU stages. In addition, the calculation of the effectiveness of the use of secondary energy resources depending on the number of stages of HPU was carried out. Several options of the model were discussed in this work, such as, two-, three-, and four-stage HPU and the coefficient of performance was calculated. Moreover, the work of these compressors for each option of the model was discussed in this work. Finally, the economic benefits of using of a multi-stage HPU instead of a traditional one-stage HPU during the annual operation of the CCGT-420T was discussed.

**References**

1. Istoriya parogazovogo tsikla v Rossii [History of the combined cycle in Russia]. Available from: <http://www.combienergy.ru/stat/900-Istoriya-parogazovogo-tsikla-v-Rossii-Perspektivy-razvitiya> (accessed: May 25, 2020). (In Russ.)

2. Sovremennaya teploenergetika [Modern heat power engineering]. Available from: [https://ozlib.com/857603/tehnika/sovremennaya\\_teploenergetika](https://ozlib.com/857603/tehnika/sovremennaya_teploenergetika) (accessed: May 25, 2020). (In Russ.)

3. Ob energosberezhenii i o povyshenii energeticheskoi effektivnosti i o vnesenii izmenenii v otdel'nye zakonodatel'nye akty Rossiiskoi Federatsii [On Energy Saving and on Improving Energy Efficiency and on Amending Certain Legislative Acts of the Russian Federation]: Federal Law of November 23, 2009 No. 261-FZ]. (In Russ.)

4. Matsevityi YuM, Chirkin NB, Klepanda AS. Ob ispol'zovanii teplovykh nasosov v mire i chto tormozit ikh shirokomasshtabnoe vnedrenie v Ukraine [On the use of heat pumps in the world and what inhibits their large-scale implementation in Ukraine]. *Energoberezhene. Energetika. Energoaudit [Energy Saving. Energy. Energy Audit]*. 2014;2:2–17. (In Russ.)

5. Molodkina MA. *Povyshenie tekhniko-ekonomicheskikh pokazatelei parogazovykh teplovykh elektrostantsii putem utilizatsii nizkopotentsial'noi teploty s ispol'zovaniem teplovykh nasosov [Improving the technical and economic indicators of combined cycle thermal power plants by utilizing low-grade heat using heat pumps]*: abstract of dissertation of the Candidate of Technical Sciences. Saint Petersburg; 2012. (In Russ.)

6. Protskno VP, Pustovalov SB, Savitsky AI, Leguenco SK. Atomno-teplonasosnaya teplofikatsiya kak novoe napravlenie v razvitii energetiki [Nuclear and heat pump heating as a new direction in the development of energy]. *Energosnabzhenie i vodopodgotovka [Energy Supply and Water Treatment]*. 2010;1:25–29. (In Russ.)

7. Chirkin NB, Kuznetsov MA, Sherstov EV, Stenikov VN. Potentsial'naya vozmozhnost' i tekhnicheskaya ratsional'nost' primeneniya teplonasosnykh tekhnologii pri kombinirovannom proizvodstve elektricheskoi i teplovoi energii [The potential and technical rationality of the use of heat pump technologies in the combined production of electric and thermal energy]. *Teploperedacha v mashinostroitel'nykh konstruksiyakh. Problemy mashinostroeniya [Heat transfer in engineering structures. Problems of engineering industry]*. 2014;17:11–20. (In Russ.)

8. Stanislav C. Low-temperature district heating distributed from transmission-distribution junctions to users: energy and environmental modelling. *Energy Procedia*. 2018;147:382–389.

9. Razin A, Mutasim B, Hossain M. Increasing the Efficiency of Steam Power Plant with the Help of Solar Energy. *Proceedings of International Conference in Developments in Renewable Energy Technology*. Dhaka, Bangladesh, 2012.

10. Le Ray G, Christensen MH, Pinson P. Detection and Characterization of Domestic Heat Pumps. *IEEE PowerTech Conference*. Milan, Italy, 2019.

11. Czarnik M, Tylman M, Jaskulski M, Wawrzyński P. Heat recovery with chemical heat pump. *Journal Chemical and Process Engineering*. 2019;40:273–279.

12. Mahlia TM, Lim JY, Aditya L. Methodology for implementing power plant efficiency standards for power generation: potential emission reduction. *Clean Technology Environment Policy*. 2018. Vol. 20. Pp. 309–327.

13. Lopatin E. Cost of Heating Pump Systems in Russia. *International Journal of Energy Economics and Policy*. 2020;10:219–223.

14. Shatalov IK, Antipov YA, Sobennikov EV, Kambiz SV. Mnogostupenchataya teplonasosnaya ustanovka povyshennoi effektivnosti [Multistage heat pump unit of increased efficiency]. *Inzhenernye sistemy – 2015 [Engineering Systems – 2015]: proceedings of the VIII International Scientific and Practical Conference*. Moscow: RUDN University; 2015. p. 541–546. (In Russ.)

15. Staffell I, Brett D, Brandon N, Hawkes A. A review of domestic heat pumps. *Energy & Environmental Science*. 2012;5:9291–9306.

16. Antipov YA, Shatalov IK, Sobennikov EV. *Mnogostupenchataya teplonasosnaya ustanovka [Multistage heat pump installation]*: utility model patent 140197 RF, IPC F25B30/00. Applicant and patent holder – Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University). No. 2013117874/06; declared April 18, 2013; published May 10, 2014. (In Russ.)

17. Antipov YA, Shatalov IK, Silin AV, Shkarin KV, Sobennikov EV. *Mnogostupenchataya teplonasosnaya ustanovka [Multistage heat pump installation]*: patent for invention 2705696 RF, IPC F25B30/00, F25B1/10. Applicant and patent holder – Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University). No. 2017102563; declared January 26, 2017; published January 25, 2018. (In Russ.)

**For citation**

Antipov YuA, Shatalov IK, Shkarin KV, Barybina AS, Ogneva YaA, Morozov PD. Modeling an effective method to utilize secondary energy resources of a combined cycle gas turbine based on the CCGT-420T. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2020;21(1):27–35. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2020-21-1-27-35> (In Russ.)