

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баланс электроэнергии и потери / [Электронный ресурс] // ПАО «Россети Центр и Приволжье» : [сайт]. – URL: [https://mrsk-cp.ru/for\\_consumers/electric\\_power\\_transmission/electric\\_capacity\\_balance/?print=Y](https://mrsk-cp.ru/for_consumers/electric_power_transmission/electric_capacity_balance/?print=Y) (дата обращения: 09.11.2024).
2. Что такое энергообъекты / [Электронный ресурс] // ПАО «Россети Запад» : [сайт]. – URL: <https://electrofriend.rosseti-sz.ru/secureelectricity/energyobjects/> (дата обращения: 10.11.2024).
3. Михайлов А.В. Мурманской области запустили самый большой в мире ветропарк // Российская газета. [Электронный ресурс]. – URL: <https://rg.ru/2023/05/15/po-vole-vetra.html?ysclid=m3ct506hx2141879230> (дата обращения: 10.11.2024).
4. FAQ (часто задаваемые вопросы) // Российская ассоциация возобновляемых источников энергии и электротранспорта. [Электронный ресурс]. – URL: <https://rawi.ru/services/faq/> (дата обращения: 11.11.2024).
5. Местников Н.П. Особенности эксплуатации солнечных электростанций микро мощности в условиях Севера. Часть 1: монография. – Якутск: ООО РИЦ «Офсет» Северо-восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, 2021 – 113 с.

## РАБОТА ПОВЕРХНОСТНОГО ТЕПЛОУТИЛИЗАТОРА В ОРГАНИЧЕСКОМ ЦИКЛЕ РЕНКИНА

**Е.С. Болдушевский, Н.Н. Галашов**

*Томский политехнический университет, ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова*

Научный руководитель: Н.Н. Галашов, к.т.н., доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ

Впрыск пара в камеру сгорания (КС) комбинированных газопаровых установок (КГПУ) позволяет существенно повысить КПД цикла [1, 2] и снизить выброс оксидов азота в атмосферу [3].

Выполненные с помощью программы расчеты тепловых схем КГПУ [4–6], показали, что ввод пара в КС позволяет повысить электрический КПД до 53–57 %.

Применение теплоутилизаторов (ТУ) в КГПУ позволяет устранить основной недостаток впрыска пара – большие выбросы теплоты и пара в окружающую среду.

Теоретические вопросы работы и применения теплоутилизаторов в энергетических установках рассмотрены в [7–9].

В работе [10] рассмотрено применение контактного теплоутилизатора с активной насадкой для отпуска теплоты в системе теплоснабжения. Главным недостатком контактных теплоутилизаторов является нагрев теплоносителя не выше температуры мокрого термометра.

В поверхностных ТУ до температуры точки росы охлаждение дымовых газов происходит в сухой зоне, а ниже – в мокрой. Эти ТУ позволяют нагревать не только однофазные жидкости и газы, но и низкокипящие рабочие тела (НРТ) до температуры перегретого пара, поэтому их можно использовать в Органическом цикле Ренкина (ОЦР) для дополнительной выработки электроэнергии [11].

В работах [12, 13] рассмотрены вопросы эффективности утилизации теплоты дымовых газов парогазовых установок (ПГУ). Особенно эффективно использовать утилизационные ПГУ в регионах с низкой температурой [14], где для конденсации пара выгодно применять воздушные конденсаторы [15].

В данной работе рассмотрена совместная работа поверхностного ТУ с ОЦР. Методика расчета поверхностного ТУ описана в [16]. Свидетельство о регистрации программы расчета ТУ на ЭВМ представлено в [17].

На рис. 1 показаны процессы в ТУ: дымовые газы от температуры  $t_{1ГПС}$  до температуры точки росы  $t_p$  отдают теплоту  $Q_{СУХ}$  теплоносителю в сухой зоне без конденсации влаги с низкой изобарной теплоемкостью, дальше от  $t_p$  до  $t_{2ГПС}$  в мокрой зоне теплота  $Q_{МОК}$  передается теплоносителю при конденсации влаги с высокой изобарной теплоемкостью, что видно по наклону линий. Теплоноситель нагревается в трубках ТУ от температуры  $t_{1Т}$  до температуры  $t'_{2Т}$ , если это жидкость или газ, и до температуры  $t_{2Т}$ , если это НРТ, которое проходит

этапы нагрева жидкости до кипения в экономайзере до точки 4, испарения при температуре насыщения  $t_{sT}$ , соответствующей давлению НРТ, в испарителе до точки 3 и перегрева пара до  $t_{2T}$ . При этом на разницу температур между газами и теплоносителем накладываются ограничения по теплообмену:  $\Delta t_{1-2} > 5 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $\Delta t_{5-4} > 5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Из рис. 1 видим, что для НРТ температура перегретого пара  $t_{2T}$  может быть значительно выше  $t_p$ , а для однофазного теплоносителя  $t'_{2T}$  не может быть выше температуры мокрого термометра.

На рис. 2 приведена схема включения ТУ в Органический цикл Ренкина. ТУ установлен в нижней части котла-утилизатора (КУ) за экономайзером. Верхняя часть КУ перед ТУ обрешена. Поток газов в состоянии 1 разделяется на две части. Основная часть потока идет на ТУ, а другая часть через шибер (Ш) идет сразу в дымовую трубу для поддержания необходимой температуры газов в трубе. Поток газов, прошедший через ТУ, в состоянии 2 проходит через сепаратор (С) и смешивается с потоком, прошедшим через шибер. В сепараторе из газов отделяется крупнодисперсная влага. В ТУ газы отдают теплоту НРТ, при этом в мокрой зоне из уходящих газов конденсируется часть влаги. Конденсат собирается в нижней части КУ и по линиям 4 и 5 конденсатным насосом КН1 перекачивается на химводоочистку для получения пара, впрыскиваемого в КС.

Полученный в ТУ перегретый пар НРТ по линии 6 идет в хладоновую турбину (ХТ), где вырабатывает механическую мощность, которая в электрическом генераторе (ЭГ) вырабатывает электрическую мощность. Из ХТ пар НРТ по линии 7 поступает в конденсатор (К), где охлаждается потоком воды или воздуха и конденсируется. Конденсат НРТ по линиям 8 и 9 конденсатным насосом КН2 перекачивается в ТУ.

Алгоритм расчета Органического цикла Ренкина подробно рассмотрен в [11].

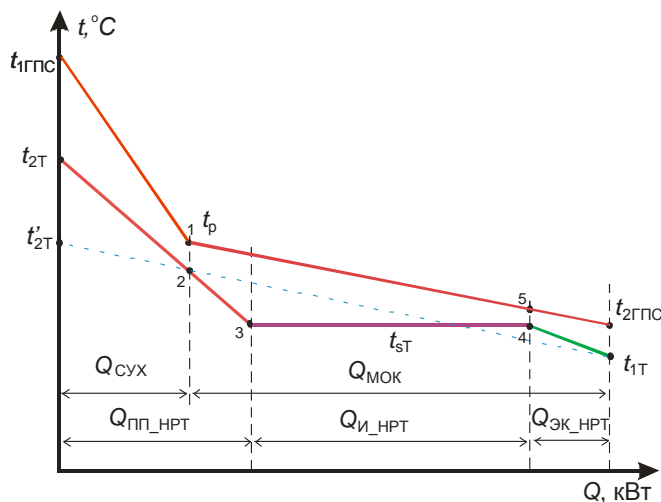


Рис. 1. Процессы в теплоутилизаторе

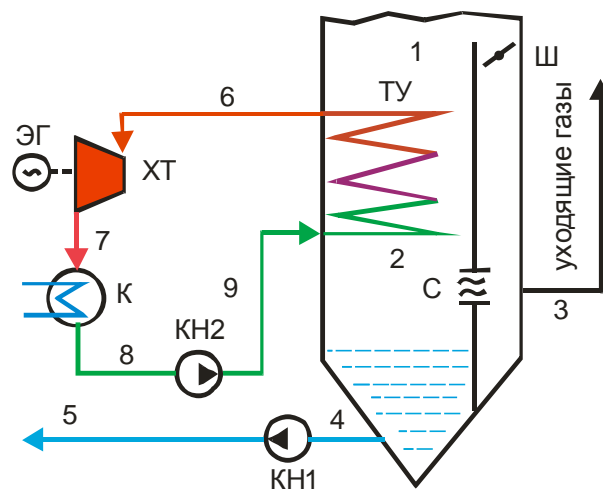


Рис. 2. Схема включения теплоутилизатора в Органический цикл Ренкина

## Заключение

Рассмотрены вопросы работы поверхностного теплоутилизатора и включения его в Органический цикл Ренкина. Установка теплоутилизатора на выходе уходящих газов из котла-утилизатора позволит снизить их температуру ниже температуры точки росы до 40–60  $^\circ\text{C}$ , что существенно сократит тепловые выбросы в атмосферу. Кроме того, из газов будет уловлено большое количество влаги, что сократит выбросы пара в окружающую среду. Уловленная влага после очистки может быть использована для получения пара в котле-утилизаторе для впрыска в камеру сгорания КГПУ.

Получение перегретого пара НРТ в теплоутилизаторе и работа его в Органическом цикле Ренкина позволит выработать дополнительную электроэнергию и повысить КПД цикла КГПУ, в который встроены теплоутилизатор с Органическим циклом Ренкина.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зысин В.А. Комбинированные и парогазовые установки и циклы. – М.; Л.: ГЭИ, 1962. – 186 с.
2. Арсеньев Л.В., Тырышкин В.Г. Комбинированные установки с газовыми турбинами. – Л.: Машиностроение, 1982. – 247 с.
3. Иванов А.А., Ермаков А.Н., Шляхов Р.А. О глубоком подавлении выбросов  $\text{NO}_x$  и  $\text{CO}$  в ГТУ с впрыском воды или пара // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2010. – № 3. – С. 119–128.
4. Галашов Н.Н., Туболев А.А., Минор А.А., Баннова А.И. Параметрический анализ схемы газопаровой установки с помощью математической модели // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, – 2021. – Т. 332, № 12. – С. 124–135.
5. Галашов Н.Н., Туболев А.А., Болдушевский Е.С., Минор А.А. Влияние расхода пара в камеру сгорания контактной газопаровой установки на ее энергетические характеристики // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335, № 2. – С. 48–59.
6. Галашов Н.Н., Туболев А.А., Минор А.А., Болдушевский Е.С. Влияние температуры впрыска пара в камеру сгорания газопаровой установки на ее энергетические характеристики // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, – 2023. – Т. 334, № 5. – С. 27–36.
7. Аронов И.З. Контактный нагрев воды продуктами сгорания природного газа. – Изд. 2. – Л.: Недра, 1990. – 280 с.
8. Кудинов А.А., Зиганшина С.К. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях. – М.: Машиностроение, 2011. – 374 с.
9. Efficiency of utilization of heat of moisture from exhaust gases of heat HRSG of CCGT / N. Galashov, S. Tsubulskiy, D. Melnikov, A. Kiselev, A. Gabdullina // MATEC Web of Conferences. – Tomsk, 2017. – P. 01027–01031.
10. Галашов Н.Н., Туболев А.А., Беспалов В.В., Минор А.А., Болдушевский Е.С. Расчет параметров схемы газопаровой установки с глубокой утилизацией и отпуском теплоты // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333, № 5. – С. 43–55.
11. Research of efficiency of the Organic Rankine cycle on a mathematical model / N. Galashov, S. Tsubulskiy, A. Gabdullina, D. Melnikov, A. Kiselev // MATEC Web of Conferences. – Tomsk, 2017. – P. 01070–01073.
12. Promising direction of perfection of the utilization combine cycle gas turbine units / A.I. Gabdullina, N.N. Galashov, S.A. Tsubulskiy, D.V. Melnikov, I.A. Asanov, A.S. Kiselev // MATEC Web of Conferences. – Tomsk, 2016. – P. 01004–01008.
13. Галашов Н.Н., Цибульский С.А. Тепловая эффективность утилизационных ПГУ тройного цикла / Н.Н. Галашов, С.А. Цибульский // Электрические станции. – 2014. – № 10(999). – С. 11–15.
14. Numerical research of steam and gas plant efficiency of triple cycle for extreme north regions / N. Galashov, S. Tsubulskii, A. Matveev, V. Masjuk // EPJ Web of Conferences. – Tomsk, 2016. – P. 01019–01022.
15. Numerical analysis of the condensation characteristics of different heat-transfer media in an air-cooled condenser / N.N. Galashov, S.A. Tsubul'ski // Power Technology and Engineering. – 2016. – Т.49. – № 5. – P. 365–370.
16. Болдушевский Е.С., Туболев А.А., Галашов Н.Н. Алгоритм расчета поверхностного теплоутилизатора // Бутаковские чтения. Сборник статей III Всероссийской с международным участием молодежной конференции. – Томск, – 2023. – С. 486–490.
17. Галашов Н.Н., Болдушевский Е.С. Расчет конденсационного утилизатора теплоты и влаги из уходящих газов // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2024664217, заявка 18.06.2024.

## DEVELOPMENT OF A COMBINED CONTROL SYSTEM OF THE ULTRAFILTRATION PROCESS FOR THE SEPARATION OF AMERICIUM AND CURIUM

O.P. Ojo

*Tomsk Polytechnic University, A2-43i Group*

Supervisor: I.S. Nadezhdin, Associate Professor, Department of Nuclear Fuel Cycle (IATES)

### Ultrafiltration for Radionuclide Separation: An Overview

Ultrafiltration utilizes a semi-permeable membrane to separate particles. The process commonly employs crossflow filtration, where the liquid flows parallel to the membrane, minimizing fouling and allowing for continuous processing.