УДК 621.311

А.А. КУДИНОВ, д.т.н., профессор (СамГТУ),
К.Р. ХУСАИНОВ, к.т.н. (СамГТУ)
г. Самара

ВЛИЯНИЕ ДВУКРАТНОГО ПРОМЕЖУТОЧНОГО ПЕРЕГРЕВА ВОДЯНОГО ПАРА В КОТЛЕ-УТИЛИЗАТОРЕ НА ТЕПЛОВУЮ ЭКОНОМИЧНОСТЬ ПГУ-420

В настоящее время на тепловых электростанциях России значительную долю (свыше 30 %) вводимых новых мощностей составляют парогазовые установки утилизационного типа (ПГУ-У) [1, 2]. ПГУ-У являются наиболее совершенными с термодинамической точки зрения энергетическими установками. Для повышения эффективности современных ПГУ следует совершенствовать термодинамический цикл паросиловой части парогазовой установки, например, путем промежуточного перегрева водяного пара, частично отработавшего в паровой турбине. Промежуточный перегрев водяного пара применяют, в основном, на мощных парогазовых энергетических блоках с трехконтурными котлами-утилизаторами (КУ) [3, 4]. К данным установкам относится одновальная парогазовая установка номинальной мощностью 420 МВт (ПГУ-420) Череповецкой ГРЭС.

ПГУ-420 состоит из одной газотурбинной установки Siemens SGT5-4000F мощностью 288 МВт, трехконтурного котла-утилизатора ЭМА-29-КУ и конденсационной паровой турбины Siemens SST5-3000. Расчетная электрическая мощность ПГУ-420 при работе с однократным вторичным перегревом водяного пара составляет 423 МВт, а ее КПД – 60,45 %.

Для повышения КПД ПГУ предлагается применить двукратный промежуточный перегрев водяного пара путем установки в хвостовой части котла-утилизатора промежуточного пароперегревателя (ПП-2) в специально выделенном газоходе после камеры дополнительного сжигания топлива (КДСТ) (рис. 1) [5]. После ГПК котла-утилизатора поток охлажденных газов ГТУ разделяется на два потока. Меньший поток уходящих газов ГТУ с расходом $G_{г2}$ является окислительной средой для осуществления процесса горения топлива в КДСТ, за которой размещается промежуточный пароперегреватель ПП-2. Основной поток уходящих газов ГТУ с расходом $G_{г1}$ после газового подогревателя конденсата (ГПК) смешивается с газами, охлажденными в ПП-2. После смешения двух потоков, суммарный поток уходящих газов в расчетном режиме при температуре 120 °С отводится в атмосферу через дымовую трубу.

В целях определения прироста КПД в результате использования двукратного промежуточного перегрева водяного пара был проведен сравнительный

анализ работы ПГУ-420 с однократным и с двукратным промежуточным перегревом пара в котле-утилизаторе по методике, изложенной в [3, 6].

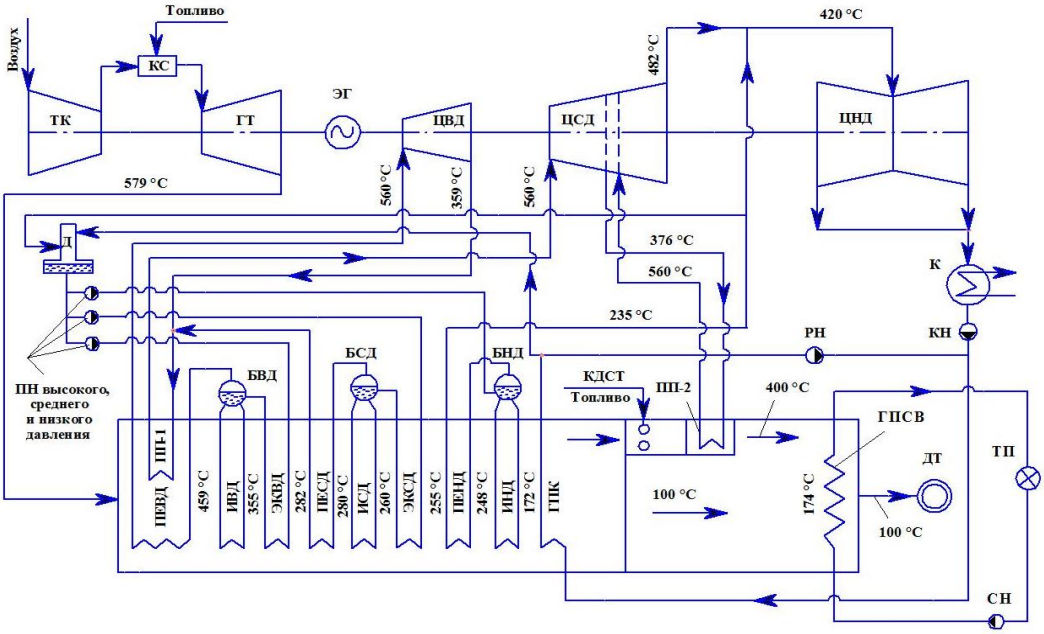

Рис. 1. Тепловая схема парогазового блока ПГУ-420 Череповецкой ГРЭС с двукратным вторичным перегревом водяного пара в КУ

Из уравнения теплового баланса для параллельно расположенных основного и промежуточного пароперегревателей определяются энтальпии газов на выходе из данных поверхностей нагрева:

$$h''_{ПЕВД-ПП} = h''_{ГТ} - \frac{D_0^{ВД}(h_0^{ВД} - h''_{S(ВД)}) + D_0^{ВД}(h_{ПП-1} - h_{СМ1})}{G_Г}. \quad (1)$$

Здесь: $D_0^{ВД}$, $G_Г$ – расходы перегретого пара высокого давления и уходящих газов ГТУ, кг/с; $h_0^{ВД}$, $h''_{S(ВД)}$ – энтальпии перегретого и насыщенного водяного пара высоких параметров, кДж/кг; $h_{см1}$, $h_{ПП-1}$ – энтальпия паровой смеси на входе в первую ступень промежуточного пароперегревателя и на выходе из нее. Расход $D_0^{ВД}$ определяется методом последовательных приближений.

В приведенной формуле энтальпия паровой смеси на входе в первую ступень промежуточного пароперегревателя определяется по формуле:

$$h_{СМ1} = \frac{D_0^{ВД} h''_{ЦВД} + D_0^{СД} h_0^{СД}}{D_0^{ВД} + D_0^{СД}}, \quad (2)$$

где $D_0^{СД}$, $h_0^{СД}$ – расход и энтальпия перегретого пара среднего давления; $h''_{ЦВД}$ – энтальпия отработавшего в ЦВД турбины водяного пара, кДж/кг.

Расход перегретого пара высоких параметров уточняется по формуле:

$$D_0^{ВД(*)} = \frac{G_Г(h''_{ГТ} - h''_{ИВД})}{(h_0^{ВД} - h_1) + (h_{ПП-1} - h_{СМ1})}, \quad (3)$$

где $h''_{ГТ}$, $h''_{ИВД}$ – энтальпии уходящих газов ГТУ на выходе из турбины и после испарителя высокого давления, кДж/кг; h_1 – энтальпия питательной воды после ЭКВД котла-утилизатора, кДж/кг.

Энтальпия паровой смеси перед проточной частью ЦНД турбины:

$$h_{СМ2} = \frac{(D_0^{ВД} + D_0^{СД})h''_{ЦСД\text{-}2} + D_0^{НД}h_0^{НД}}{D_0^{ВД} + D_0^{СД} + D_0^{НД}}. \quad (4)$$

Здесь $D_0^{НД}$, $h_0^{НД}$ – расход и энтальпия перегретого водяного пара низких параметров.

Электрическая мощность паровой турбины определяется суммой внутренних мощностей цилиндров N_i с учетом электромеханического КПД $\eta_{МГ}$:

$$N_{ПТ} = (N_i^{ЦВД} + N_i^{ЦСД-1} + N_i^{ЦСД-2} + N_i^{ЦНД}) \cdot \eta_{МГ}. \quad (5)$$

Коэффициент полезного действия ПГУ-420 определяется по формуле:

$$\eta_{ПГУ} = \frac{N_{ГТУ} + N_{ПТ}}{B_{КС}Q_H^P + B_{КДСТ}Q_H^P}, \quad (6)$$

где $B_{КС}$, $B_{КДСТ} = \frac{G_{Г2}(h'_{ПП-2} - h''_{ПП-2}) - G_{Г2}h''_{ГПК}}{Q_H^P}$ – расходы топлива в камеру сгорания ГТУ и в КДСТ котла-утилизатора, кг/с; Q_H^P – низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг; $G_{г2}$, $h'_{ПП-2}$, $h''_{ПП-2}$ – расход и энтальпии газов перед второй ступенью промежуточного пароперегревателя и на выходе из нее.

На рисунке 2 представлена тепловая диаграмма трехконтурного котла-утилизатора с двукратным промежуточным перегревом водяного пара. В ПП-1 водяной пар перегревается с 343 °С до 560 °С, а в ПП-2 с 427 °С до 560 °С.

Расчетным путем установлено, что при осуществлении двукратного промежуточного перегрева водяного пара КПД ПГУ-420 по сравнению с вариантом однократного промперегрева повышается на 0,92 % (с 60,45 до 61,37 %). Мощность ПГУ-420 возрастает на 3,7 % (с 422,94 до 438,61 МВт). Удельный расход условного топлива снижается на 1,5 % (с 203,47 до 200,42 г/кВт·ч). Степень сухости водяного пара возрастает на 6,03 % (с 93,2 до 99,23

%). КПД паровой турбины возрастает на 1,15 % (с 36,26 до 37,41 %), а ее мощность – на 11,61 % (с 134,94 до 150,61 МВт).

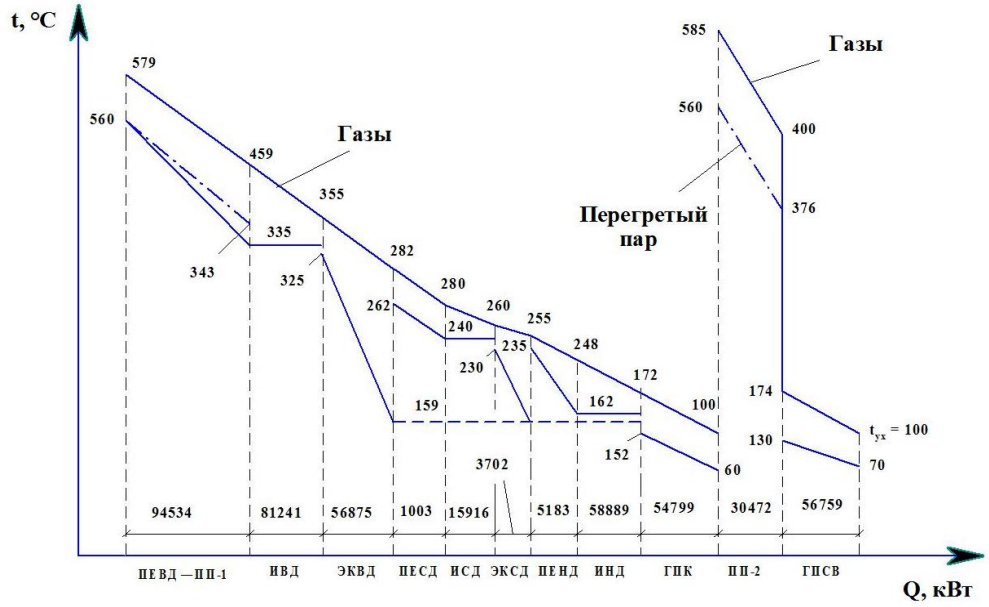

Рис. 2. Тепловая диаграмма трехконтурного котла-утилизатора с промежуточным перегревом водяного пара: t – температура, Q – тепловая мощность

Повышение экономичности установки за счет введения второго промежуточного перегрева водяного пара при наработке 7500 ч/год в денежном выражении при стоимости условного топлива 3700 руб/т.у.т. составляет 48,0 млн. руб в год.

Список литературы

1. Кудинов А.А. Тепловые электрические станции. Схемы и оборудование: учеб. пособие для вузов. – М.: ИНФРА-М, 2012. – 325 с.

2. Кудинов А.А., Зиганшина С.К. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях. – М.: Машиностроение, 2011.– 374 с.

3. Трухний А.Д. Парогазовые установки электростанций: учеб. пособие для вузов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2013. – 648 с.

4. Цанев С.В., Буров В.Д., Ремезов А.Н. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций: учеб. пособие для вузов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009. – 584 с.

5. Патент 2756940 РФ. МПК^7 F 01 K 23/10. Способ работы парогазовой установки электростанции / А.А. Кудинов, С.К. Зиганшина, Э.Ф. Валеева, Е.А. Кудинов; заявитель и патентообладатель: Самарск. гос. техн. ун-т. – № 2020134817; заявл. 22.10.2020; опубл. 07.10.2021. Бюл. № 28. – 10 с.

6. Кудинов А.А., Зиганшина С.К. Парогазовые установки тепловых электрических станций: учеб. пособие для вузов. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2019. – 220 с.

Информация об авторах:

Кудинов Анатолий Александрович, профессор, СамГТУ, 443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Главный корпус, кафедра ТЭС, a.a.kudinov@yandex.ru

Хусаинов Кирилл Русланович, доцент, СамГТУ, 443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Главный корпус, кафедра ТЭС, kirill.czvra@mail.ru