

УДК 628.16.067.1

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ КОГЕНЕРАЦИОННОЙ  
СИСТЕМЫ ЗА СЧЁТ ЗАМЕНЫ ПАРООХЛАДИТЕЛЯ  
IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY OF THE COGENERATION  
SYSTEM BY REPLACING THE STEAM COOLER**

П.А. Болбас, А.Д. Яковенко

Научный руководитель – Л.А. Тарасевич, к.т.н., доцент  
Белорусский национальный технический университет, г. Минск

P. Bolbas, A. Yakovenko

Supervisor – V. Tarasevich, Candidate of Technical Sciences, Docent  
Belarusian national technical university, Minsk

***Аннотация:** Изучение повышение энергоэффективности в результате замены парохладителя паровоздушным подогревателем, который снижает температуру перегретого пара до температуры насыщения и увеличивает температуру воздуха перед его отправкой в котел.*

***Abstract:** An increase in energy efficiency is being studied as a result of replacing the steam cooler with a steam-air heater, which reduces the temperature of the superheated steam to the saturation temperature and increases the temperature of the air before it is sent to the boiler.*

***Ключевые слова:** Котел, теплообменник, энергетическая система, когенерация, пар.*

***Key words:** Boiler, heat exchanger, energy system, cogeneration, steam.*

### **Введение**

Система когенерации вырабатывает как электрическую, так и полезную тепловую энергию. Пар, отбираемый из паровой турбины, обычно перегрет. Перегретый пар не так подходит для технологического нагрева, как насыщенный пар, поскольку он обеспечивает более низкую скорость теплопередачи и требует большей площади теплопередачи.

Поэтому перегретый пар необходимо охладить. Распространенным методом парохладителя является смешивание перегретого пара с охлаждающей водой для получения насыщенного пара в теплообменнике прямого контакта, известном как парохладитель.

Ранее было показано, что этот метод охлаждения не является самым энергоэффективным. Другой метод парохладителя заменяет парохладитель на бесконтактный теплообменник, известный как паровоздушный подогреватель, который увеличивает температуру воздуха от температуры окружающей среды до более высокой температуры до того, как воздух нагреется в воздухонагревателе. исследования показали, что паровоздушный подогреватель можно использовать для повышения эффективности регенеративного цикла Ренкина с двойным подогревом. Таким образом, ожидается повышение энергоэффективности в системе когенерации, интегрированной с паровоздушным подогревателем.

### Основная часть

Рисунок 1 (а) иллюстрирует обычную когенерационную систему. Топливо попадает в котел (В) вместе с окружающим воздухом. Тепловая энергия от сгорания топлива производит перегретый пар, который покидает котел с массовым расходом  $m_s$ , давлением  $p_s$  и температурой  $T_s$ . Тип турбины, установленной в этой системе, - паровая турбина с отбором и конденсацией (Т). Давление пара в точке отбора составляет  $p_p$ , то есть такое же давление, которое требуется для процесса (Р). Оставшийся пар конденсируется в конденсаторе (С). Часть конденсированной воды используется для охлаждения в теплообменнике прямого контакта, известном как пароохладитель (DS), а оставшаяся вода возвращается в котел [1]. Температура отводимого пара ( $T_e$ ) зависит от изоэнтальпического КПД турбины. В типичной системе эта температура больше, чем температура насыщения ( $T_p$ ). Следовательно, отводимый пар перегревается. Насыщенный пар при массовом расходе  $m_p$ , необходимом для процесса испарения, получается в результате смешивания извлеченного пара и охлаждающей воды в пароохладителе. Массовый расход охлаждающей воды ( $m_{cw}$ ) может быть определен из массового и энергетического балансов пароохладителя.

$$m_{cw} = m_p \left( \frac{h_e - h_p}{h_e - h_c} \right) \quad (1)$$

где:  $h_e$ ,  $h_p$  и  $h_c$  - энтальпии отводимого пара, насыщенного пара при давлении  $p_p$  и охлаждающей воды соответственно. Следовательно, массовый расход отбираемого пара равен

$$m_e = m_p \left( \frac{h_p - h_c}{h_e - h_c} \right) \quad (2)$$

Насыщенный пар конденсируется в процессе испарения и превращается в насыщенную жидкую воду. Затем он смешивается с конденсированной водой из конденсатора в смесительной камере (М), чтобы стать питательной водой для котла. Предположим, что повышение температуры из-за перекачки незначительно, температура питательной воды на входе в котел определяется по ее энтальпии ( $h_{wi}$ ). Энергетический баланс в смесительной камере дает

$$h_{wi} = \frac{(m_s - m_p)h_c + m_p h_p}{m_s} \quad (3)$$

Рисунок 1 (b) иллюстрирует модифицированную систему когенерации. Эта система аналогична традиционной, за исключением замены пароохладителя на паровоздушный подогреватель (SP). Окружающий воздух нагревается в паровоздушном подогревателе, так что его температура повышается от  $T_a$  до  $T_{ai}$  перед поступлением в котел. Паровоздушный подогреватель представляет собой рекуперативный теплообменник. При установке подходящей площади поверхности нагрева в паровоздушном подогревателе возможно насыщение пара на выходе из паровоздушного подогревателя. Как следствие, температура пара снижается с  $T_e$  до  $T_p$  перед тем, как вступить в процесс испарения (Р).

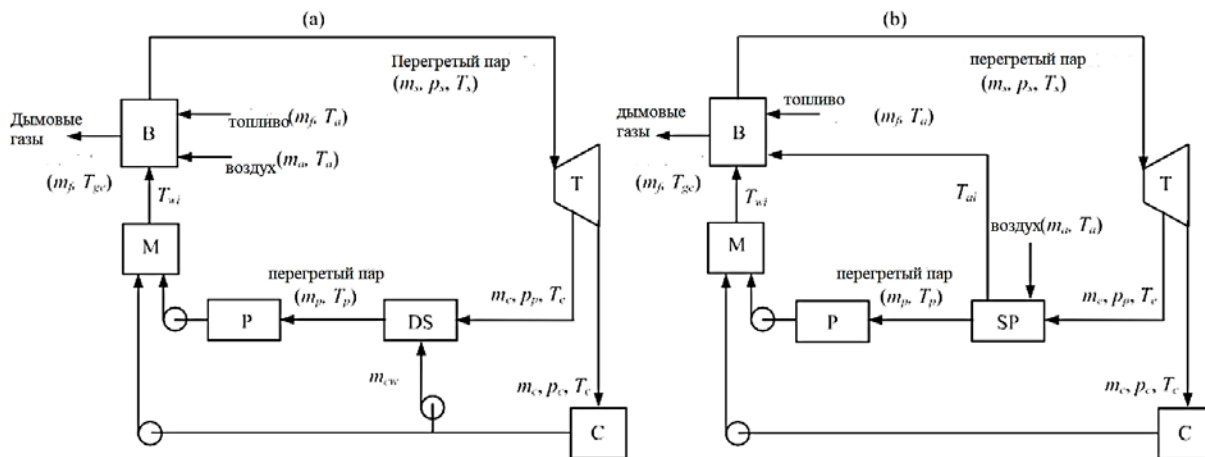


Рисунок 1 – (a) Обычная когенерационная система и (b) Модифицированная когенерационная система

Подогреватель пар-воздух моделируется как противоточный теплообменник. Следовательно, уравнения теплообмена и баланса энергии имеют вид:

$$m_p c_{pv} (T_e - T_{pv}) = U_{SP} A_{SP} \left\{ \frac{(T_e - T_m) - (T_p - T_a)}{\ln |(T_e - T_{ai}) / (T_p - T_a)|} \right\} \quad (4)$$

$$m_a c_{pa} (T_{ai} - T_a) = m_p c_{pv} (T_e - T_p) \quad (5)$$

где:  $c_{pa}$  и  $c_{pv}$  – удельные теплоемкости воздуха и пара,  $ASP$  – площадь поверхности паровоздушного подогревателя, а  $USP$  – общий коэффициент теплопередачи паровоздушного подогревателя, который принимается равным  $0,03 \text{ кВт} / \text{м}^2 \cdot \text{К}$ . В условиях, когда массовый расход топлива ( $m_f$ ) и параметры технологического пара ( $m_p$  и  $p_p$ ) одинаковы в обеих когенерационных системах, параметром, который может использоваться для сравнения обеих систем, является выходная мощность.

Выходная мощность традиционной когенерационной системы ( $P_{con}$ ) и модифицированной когенерационной системы ( $P_{mod}$ ) равна:

$$P_{con} = (m_p - m_w)(h_s - h_e) + (m_s - m_p + m_w)(h_s - h_c) \quad (6)$$

$$P_{mod} = m_p(h_s - h_c) + (m_s - m_p)(h_s - h_c) \quad (7)$$

где  $h_s$ ,  $h_e$  и  $h_c$  – удельные энтальпии на входе в турбину, в точке отбора и в конденсаторе. И  $h_e$ , и  $h_c$  определяются из известного значения КПД турбины.

Рассмотрим гипотетический котел, работающий в традиционной когенерационной системе. Давление в котле (пс) составляет  $4,0 \text{ МПа}$ . Массовый расход топлива ( $m_f$ )  $6,5 \text{ кг} / \text{с}$ . Высшая теплота сгорания топлива  $8796 \text{ кДж} / \text{кг}$ . Массовый расход пара (т.пл.) на испарение составляет  $11,11 \text{ кг} / \text{с}$  ( $40 \text{ т} / \text{ч}$ ). Давление отбираемого пара ( $p_p$ ) составляет  $200 \text{ кПа}$ , что соответствует требуемому давлению технологического пара. КПД паровой турбины составляет  $75\%$ . Следовательно, температура отводимого пара ( $T_e$ ) составляет  $180 \text{ }^\circ\text{C}$ , тогда как температура насыщенного пара ( $T_p$ ) при том же давлении составляет  $120 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Давление в конденсаторе (ПК) составляет 10 кПа, а температура охлаждающей воды, подаваемой в пароохладитель, составляет 46 °С. Следовательно, массовый расход охлаждающей воды, необходимый для охлаждения, составляет 0,54 кг / с. Выходная мощность ( $P_{con}$ ) 8219 кВт.

Модели модифицированной когенерационной системы и промышленного котла, описанные в разделах 2 и 3, теперь используются для прогнозирования производительности системы, когда один и тот же котел работает в модифицированной когенерационной системе. При неизменных значениях  $m_p$  и  $p_p$  в модифицированной когенерационной системе требуемая площадь поверхности паровоздушного подогревателя (ПВП) составляет 547 м<sup>2</sup>. Массовый расход ( $m_s$ ) и температура ( $T_s$ ) пара, вырабатываемого котлом в модифицированной когенерационной системе, составляют 13,9 кг / с и 467 °С, что на 1,4% и 0,26% соответственно больше, чем  $m_s$  и  $T_s$  в обычной когенерационной системе. Выходная мощность ( $P_{mod}$ ) модифицированной когенерационной системы составляет 8249 кВт, что на 0,4% больше выходной мощности ( $P_{con}$ ) традиционной когенерационной системы. Температура дымовых газов на выходе из модифицированной когенерационной системы составляет 142,7 °С, что также больше, чем у традиционной когенерационной системы (118,5 °С).

КПД котла увеличивается с понижением температуры дымовых газов на выходе из котла. Следовательно, энергоэффективность модифицированной когенерационной системы может быть улучшена, а выходная мощность может быть увеличена за счет увеличения площади поверхности экономайзера. Это улучшение требует модификации котельной системы, как показано на рисунке 2.

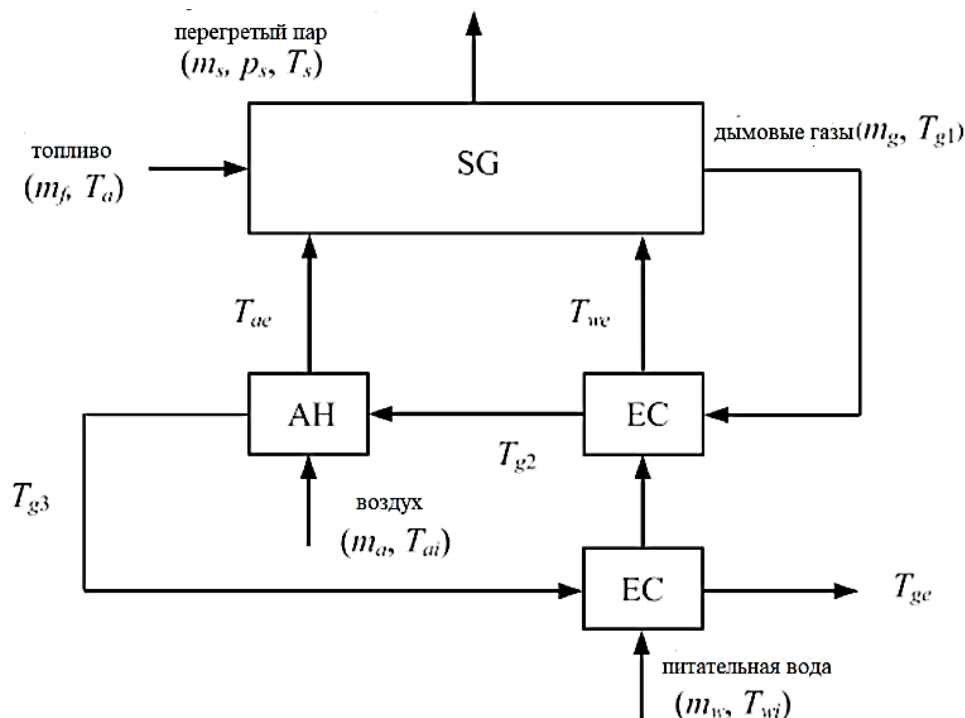


Рисунок 2 – Доработка котла за счет установки дополнительной площади поверхности экономайзера после воздухонагревателя

Можно видеть, что после воздухонагревателя устанавливается дополнительная площадь поверхности экономайзера, так что температура дымовых газов снижается с  $T_{gz}$  до  $T_{ge}$ . На рисунке 3 показано, что увеличение площади поверхности экономайзера приводит к увеличению расхода пара, увеличению выходной мощности, снижению температуры пара и снижению температуры отходящих газов.

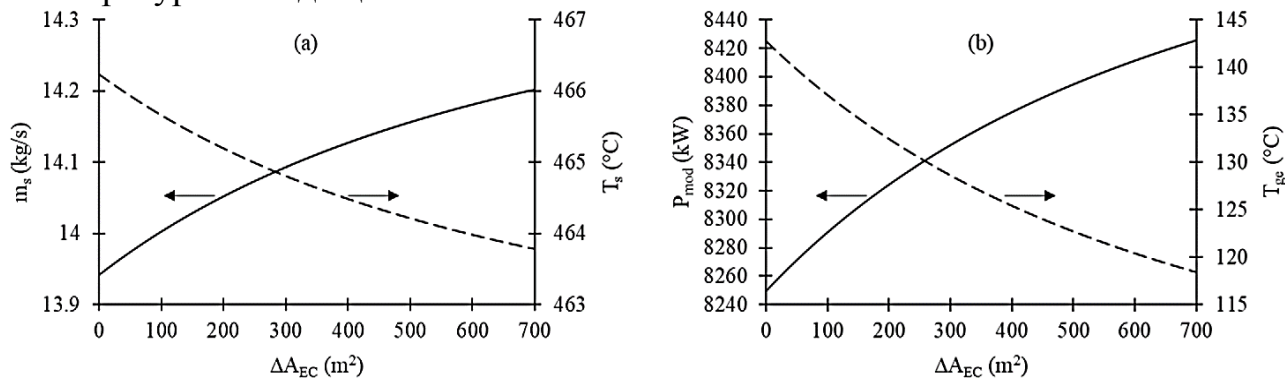


Рисунок 3 – Влияние дополнительной площади поверхности экономайзера ( $\Delta A_{EC}$ ) на (a) расход пара ( $m_s$ ) и температуру пара ( $T_s$ ), и (b) выходную мощность модифицированной когенерационной системы ( $P_{mod}$ ) и температуру отходящих газов на выходе. ( $T_{ge}$ )

Эта температура должна быть выше температуры точки росы дымовых газов, чтобы избежать конденсации воды в трубках воздухонагревателя, которая может привести к коррозии.[2] Если температура отходящих газов на выходе модифицированной когенерационной системы ограничена не более  $118,5^{\circ}C$ , что является температурой уходящих дымовых газов традиционной когенерационной системы, максимальная выходная мощность ( $P_{mod, max}$ ) модифицированной когенерационной системы составляет  $8425 kW$ , что на  $2,5\%$  больше, чем  $P_{con}$ . Соответствующие значения площади дополнительной поверхности экономайзера и площади паровоздушного подогревателя составляют  $696 m^2$  и  $533 m^2$ .

### Закключение

В типичной когенерационной установке пар, отобранный из паровой турбины, обычно перегрет, и перед подачей в процесс, требующий насыщенного пара, его необходимо охладить. Обычный метод охлаждения - это смешивание перегретого пара с охлаждающей водой в теплообменнике прямого контакта, известном как пароохладитель. Основная цель данной статьи – изучить повышение энергоэффективности в результате замены пароохладителя паровоздушным подогревателем, который снижает температуру перегретого пара до температуры насыщения и увеличивает температуру воздуха перед его отправкой в котел. Результаты моделирования эталонной когенерационной системы показывают, что установка паровоздушного подогревателя может увеличить выходную мощность на  $0,4\%$ . Увеличение выходной мощности до  $2,5\%$  достигается за счет установки дополнительной площади поверхности экономайзера.

### Литература

1. Пароперегреватели. Устройство пароперегревателей [Электронный ресурс]/ пароперегреватели. – Режим доступа: <https://mechanicinfo.ru/paroperegrevateli-ustrojstvo-paroperegrevatelej/>. – Дата доступа: 27.03.2021.
2. Пароперегреватель [Электронный ресурс]/ пароперегреватель. – Режим доступа: <http://engineeringssystems.ru/p/paroperegrevatel.php/>. – Дата доступа: 27.03.2021.