

УДК 621.382

**Анализ возможности повышения экономичности контактной газопаровой установки
по схеме «Водолей»**

Ю.В. Фишер

Студент, кафедра «Газотурбинные и нетрадиционные энергоустановки»

МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия

*Научный руководитель: Иванов В.Л., к.т.н., доцент кафедры «Газотурбинные и
нетрадиционные энергоустановки» МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия*

МГТУ им. Н.Э. Баумана

juliavlfisher@gmail.com

Одним из направлений эффективного развития и технического перевооружения российской теплоэнергетики является широкое применение высокоэкономичных парогазовых и газотурбинных установок. Особое внимание уделяется внедрению энергосберегающих технологий, повышению эффективности преобразования содержащейся в топливе энергии в электричество и тепло. Современные газотурбинные установки (ГТУ) используют в качестве когенерационных установок, что позволяет использовать теплоту топлива с максимальной эффективностью.

Одним из наиболее перспективных направлений развития современной энергетики является создание высокоэкономичных газо- и паротурбинных установок, преимущественно комбинированного цикла. Наибольшее распространение среди комбинированных станций получили так называемые бинарные установки, в которых пароводяное и газообразное рабочие тела движутся по самостоятельным трактам, взаимодействуя посредством теплообмена в парогенераторе и котле-утилизаторе (при наличии регенератора теплоты в установке).

Альтернативой бинарной парогазовой установке (ПГУ) являются газопаровые установки (ГПУ) с впрыском пара (контактные ГПУ или ГПУ смешения). Их основное

отличие от бинарной ПГУ состоит в отсутствии конденсационной паровой турбины с конденсатором и соответствующей системой охлаждения. В сравнении с бинарными ПГУ газотурбинные установки с впрыском пара имеют результирующий КПД на 1,5–2,0% ниже. Кроме того, состав оборудования контактных ГТУ проще, а удельные капиталовложения меньше, чем у ПГУ бинарного цикла. По своей технологической схеме ГТУ с впрыском пара является наиболее простой из всех установок комбинированного цикла.[2]

В настоящее время контактные когенерационные газотурбинные установки находят применение как высокоэффективные источники тепловой и электрической энергии во многих странах мира. Такие установки, выполненные на основе уже готовых ГТУ, отличаются достаточной надежностью, относительной простотой и экологичностью.

В газопаровых установках контактного типа возможны различные схемы ввода пара в тракт, но практическое признание получили ГПУ с вводом пара в камеру сгорания: малой массы – в зону горения для предотвращения образования оксидов азота термическим путем из воздуха, поступающего в зону горения, и основной массы, которая подается в зону смешения камеры сгорания, выполняя предварительно функцию охладителя стенок жаровой трубы камеры. В результате весь поток пара становится, вместе с продуктами сгорания, рабочим телом турбины. Для генерации пара в контактной установке типа «Водолей» предусмотрен котел-утилизатор, в котором используется теплота отработавших газов. Ввод пара при сохранении производительности компрессора увеличивает расход рабочего тела через турбину. Удельная работа установки:

$$L_e = (1 + d)H_T\eta_T\eta_M - \frac{H_K}{\eta_K}, \quad (1)$$

где H_T – теплоперепад, срабатываемый в турбине, Дж/кг; H_K – теплоперепад в компрессоре, Дж/кг; η_T, η_K, η_M – коэффициент полезного действия (КПД) турбины, компрессора и механический КПД соответственно; d – паросодержание, определяемое по формуле:

$$d = \frac{G_{\text{п}}}{G_{\text{г}}}, \quad (2)$$

где $G_{\text{п}}$ - расход пара, кг; $G_{\text{г}}$ - расход газа, кг [1].

В установке по схеме «Водолей» пар, полученный в утилизационном котле, используется как экологический впрыск и для получения дополнительной мощности

установки (технологический впрыск). В контактном конденсаторе, установленном за котлом-утилизатором, осуществляется конденсация и улавливание воды из отходящей парогазовой смеси, что исключает вынос воды (пара) вместе с выхлопными газами и сокращает требуемое количество котловой очищенной воды [4].

При работе ГПУ «Водолей» мощностью 16 МВт на номинальном режиме, отработавшая парогазовая смесь при выходе из парогенератора охлаждается до 413–453 К и имеет достаточный потенциал для дальнейшей и более глубокой утилизации тепла.

Выполнен анализ эффективности контактной когенерационная ГПУ с двухступенчатой утилизацией тепла, схема которой представлена на рисунке. В исследуемом цикле высокопотенциальное тепло выхлопных газов используется для генерации пара в котле-утилизаторе, а низкопотенциальное тепло – для получения горячей воды. Охлаждение газопаровой смеси в парогенераторе происходит 100 °С, а в утилизационном теплообменнике до 30–40 °С, что позволяет использовать скрытую теплоту конденсации; последняя является основной теплотой водогрейного котла [2].

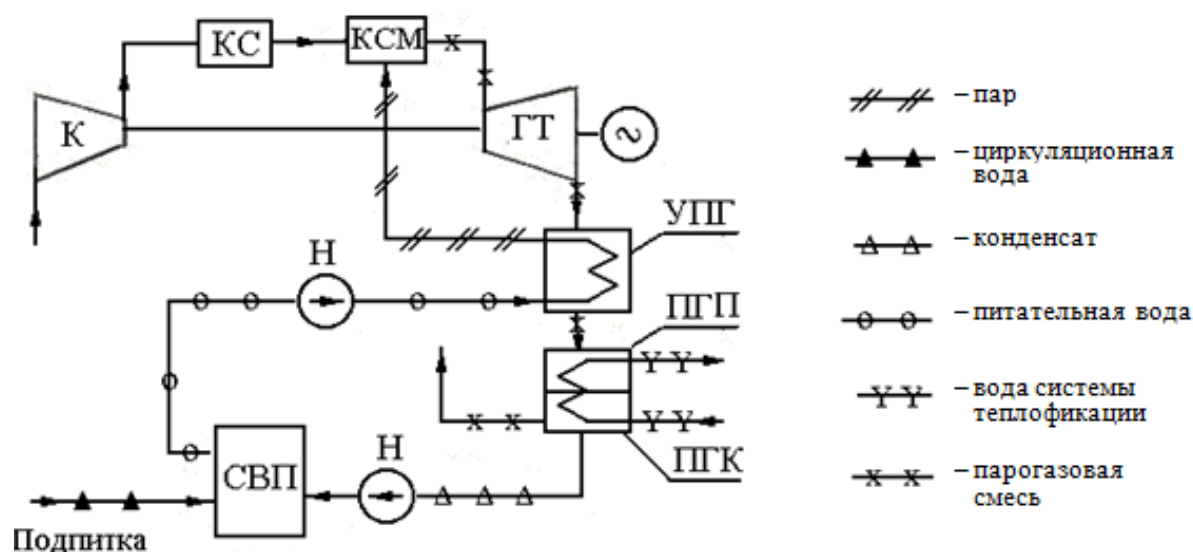


Рис. 1. Схема ГТУ с впрыском пара и водогрейным котлом: К – компрессор; КС – камера сгорания; КСМ – камера смешения; ГТ – газовая турбина; Н – насос; УПГ – утилизационный парогенератор; ПГП – парогазовый подогреватель; ПГК – парогазовый конденсатор; СВП – система водоподготовки

Другим возможным направлением повышения удельной мощности рассматриваемой установки служит замена воздуха паром в системе охлаждения лопаток газовой турбины. Для системы конвективного охлаждения водяной пар является, по сравнению с воздухом, более эффективным охладителем, обладая лучшим сочетанием

теплопроводности, теплоемкости, вязкости. Кроме того, система циркуляции охладителя включает в себя жидкостной насос, а не воздушный компрессор, что значительно сокращает затраты энергии на компремирование охлаждающей среды:

$$d = G_{\text{H}_2\text{O}} \left(\frac{\Delta p}{\rho} \right)_{\text{H}_2\text{O}} \frac{1}{\eta_{\text{H}}}, \quad (3)$$

где $G_{\text{H}_2\text{O}}$ – расход пара через систему охлаждения, кг/с; Δp – гидравлическое сопротивление каналов системы охлаждения и элементов подводящего тракта; ρ – плотность воды, поступающей в циркуляционный насос, кг/м³; η_{H} – КПД насоса.

При адекватных условиях расход пара на систему охлаждения ниже расхода воздуха. При переходе к паровому охлаждению конструктивно наиболее просто осуществляется подвод пара на охлаждение сопловых аппаратов турбины. Поэтому на первой стадии внедрения парового охлаждения целесообразно сохранить воздушное охлаждение дисков ротора и рабочих лопаток турбины. Принимая во внимание, что при вводе пара, равно как и воздуха, системы охлаждения в проточную часть турбины введенный охладитель совершает реальную работу на лопатках турбины лишь через 2-3 лопаточных ряда. В связи с этим рассматривается двухпоточный ввод пара в сопловые лопатки первой ступени. Основной поток пара, охлаждающий около 75% поверхности лопатки, поверхность верхней и нижней полки лопатки после совершения функции охлаждения отводится в зону смешения камеры сгорания. Затем этот пар как полноценное рабочее тело совершает работу на всех ступенях турбины. Поток пара, направленный на охлаждение зоны выходной кромки, через щели выходной кромки выводится в проточную часть за сопловым аппаратом, как и при воздушном охлаждении.

Попытки реализации проникающего жидкостного охлаждения (водяного) имеют давнюю историю. Такие работы прослеживаются в отечественных и зарубежных публикациях, начиная с 60-х годов прошлого столетия [3]. Но одной из возможных сдерживающих причин (наряду с более серьезными другими) является опасность закупорки пористых каналов отложениями солей, полное удаление которых из воды не гарантирует даже наиболее совершенные способы. Поэтому современной является конвективная схема охлаждения лопаток в чисто паровом или смешанном (пар+воздух) варианте. Следует отметить, что для увеличения хладоресурса воздуха воздушной системы охлаждения за счет понижения его температуры может использоваться его предварительное охлаждение питательной водой ГПУ.

Список литературы

1. Зысин В. А. Комбинированные парогазовые установки и циклы. Л., Госэнергоиздат, 1962, 186 с., с ил.
2. Морозенко М.И., Землянский А.В., Григорьев В.Г. Исследование эффективности контактной когенерационной ГТУ // Материалы XII Всероссийской межвузовской научно-технической конференции "Газотурбинные комбинированные установки и двигатели". М., 2004. С. 32–34.
3. Итоги науки и техники, серия «Турбостроение», Том 4 /Э.С. Манушин [и др.] Москва, 1990. 180 с.
4. В.В. Романов Новая высокоэкономичная газопаротурбинная установка «Водолей»: опыт эксплуатации пилотной установки на КС Ставищенская (Украина) // Территория Нефтегаза, 2009, №9, С. 85-87.