

О ВЫБОРЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ ПРОМЫШЛЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Habits of application of the gas-turbine drives working on regeneration and air-utilization of cycles are considered, which are intended for substitution of the out-of-date drives on compressor plants of Ukraine. Operating performances of machines are resulted, and the estimation of economic efficiency of their application is given.

Основная область применения промышленных ГТУ в Украине – газотранспортная система, которая является одной из наибольших в Европе. Здесь на компрессорных станциях в составе ГПА эксплуатируются более 80% физически изношенных и морально устаревших газотурбинных приводов (с ресурсом > 100000 часов и КПД на уровне 21...25%). К их числу следует отнести машины ГТК-10, ГТК-25, ГТ-750-6, ГТК-10И, ГТК-25И и др. Как следствие приведенной ситуации – затраты на топливный газ для приводных ГТД в Украине в 2007г. составили более 4,9 млрд. нм³. Если все устаревшие ГПА, которые отработали 15...30 лет, заменить современными ГТД с КПД ≈ 40%, то можно уменьшить затраты топливного газа КС порядка на 1,9 млрд. нм³ в год. Указанные выше приводные двигатели заводами (расположенными за пределами Украины не выпускаются) и поэтому интереса как объект модернизации не представляют.

Значение КПД не менее 40...41% в настоящее время является ориентиром для перспективных ГТУ, работающих по «сухим» циклам (без пароводяных утилизационных надстроек). Для этого существуют различные подходы с применением регенеративных схем, как простой, так и более сложной конфигураций. Принципиально возможно и обеспечение КПД более 40% и в ГТУ простого термодинамического цикла при уровне мощности более 25...30 МВт, что связано с реализацией высоких значений параметров рабочего процесса π_K^* и T_G^* , использованием прогрессивных 3-D методов проектирования основных узлов, а также применением новых материалов [1]. При этом следует заметить, что замена наиболее массового приводного двигателя ГТК-10 на агрегат мощностью 25...30 МВт (укрупнение единичной мощности) приведет к существенному росту экономического эффекта.

Рассмотрим более подробно особенности в применении регенеративных циклов. Известно, что на величину КПД ГТУ наиболее существенно влияют степень регенерации ε , степень подогрева рабочего тела θ и степень повышения давления в цикле π_K^* . Проведенные экономические оценки с учетом цен на энергоносители свидетельствуют о том, что в настоящее время наиболее рациональные значения ε находятся в пределах 0,8...0,85. В ряде

работ это значение принимают на уровне 0,9 [2]. Вместе с тем известно, что увеличение степени регенерации от 0,8 до 0,9 при прочих равных условиях сопровождается ростом поверхности рекуператора ≈ 2,25 раза.

На рис.1 показана оценка возможности увеличения КПД установки простой регенеративной схемы (ГТУ-Р) с различными значениями степени повышения давления и температуры газа перед турбиной, проведенная в ЦИАМ [3]. Видно, что при уровне температуры газа в 1550К, освоенной промышленностью, и $\pi_K^* = 10$ можно достичь КПД 42,5% (при степени регенерации 0,83 и суммарном гидравлическом сопротивлении ≤ 5%).

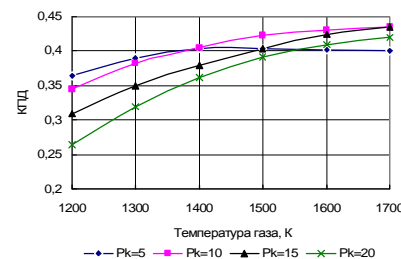


Рис. 1 – Зависимость КПД ГТУ-Р от T_G



Рис. 2 – Mercury 50

В известной энергетической установке фирмы Solar Turbines Inc. «Mercury 50», выполненной по схеме ГТУ-Р, при параметрах цикла $\pi_K^* = 9$, $T_G^* = 1435\text{K}$ и степени регенерации 0,9 обеспечен КПД порядка 40%. Данная схема характерна верхним расположением рекуператора (Рис.2). В качестве примера следует привести и проект НПО «Сатурн» ГТУ-6,3 РАЛ: ($\pi_K^* = 6,9$; $T_G^* = 1518\text{K}$) с КПД 40,5%.

В конце 90-х гг. для повышения топливной экономичности ГТК-25И ООО «Пермтрансгаз» и «Тюментрансгаз» были куплены комплекты агрегаты ГТНР-25И регенеративного цикла фирмы «Нуово Пиньоне» с коэффициентом регенерации 0,83 и достаточно низкой температурой $T_G^* = 1223\text{K}$. Опыт их эксплуатации показал, что эффективный КПД приводного ГТД увеличился на 6% абсолютных и составил 33,6% при снижении мощности на 2 МВт (исходная мощность – 24,5 МВт) вследствие увеличения сопротивления трактов машины. Это привело к снижению КПД нагнетателей природного газа и невозможности выхода их на номинальную частоту вращения [2].

Следует отметить, что в Украине спроектированы и серийно изготавливаются ГТУ простого термодинамического цикла с высокими параметрами рабочего процесса ($\pi_K^* = 19...26$ и $T_G^* = 1450...1550\text{K}$) и КПД 34...37%. Применение здесь простой регенеративной надстройки, естественно, нерационально. Разработка же нового двигателя с низким значением π_K^* приведет к росту затрат на НИОКР, отработку технологий

создания опытного образца и подготовку серийного производства. В сочетании с отсутствием опыта проектирования и доводки надежных рекуператоров с указанными выше параметрами значительно увеличится время создания машины и сроки окупаемости проекта.

Достаточно высокие давления процесса регенерации в ГТУ-Р (0,6...1,0 МПа) приведет к утечкам рабочего тела по мере эксплуатации машины, что отрицательно скажется на вырабатываемой мощности и КПД.

Для повышения КПД установки до уровня 43...46% в схеме ГТУ-Р следует использовать промежуточное охлаждение в процессе сжатия рабочего тела. Однако, как отмечается в работе [4], цикл с промежуточным охлаждением и рекуператором является достаточно сложным в конструктивном исполнении. Это связано с наличием дополнительного теплообменника-охладителя воздуха между каскадами компрессора, в котором снимается большая тепловая мощность. Сюда следует отнести и трудности, связанные с обеспечением герметичности стыков, затраты на дополнительную мощность на привод жидкостных насосов или воздушных вентиляторов. Наличие промежуточного охлаждения между каскадами компрессора значительно обостряет проблему обеспечения устойчивой работы первого каскада, что влечет за собой введение дополнительных регулирующих элементов и усложнение САУ двигателя. Это вынуждает специалистов зачастую отказываться от применений такой схемы на КС.

Таким образом, применение ГТУ-Р вряд ли можно считать рациональным путем модернизации КС.

Вместе с тем существует и другой способ повышения КПД ГТУ с использованием регенеративных схем. Суть его заключается в применении регенерацией в сочетании с воздушной утилизацией либо в отдельной дополнительной воздушной турбине (ГТУ-УТ), либо в дополнительном воздушно-турбинном двигателе (ГТУ-ВТД). В таких машинах можно получить значение КПД на уровне 44...48%.

В **первом** случае воздух частично отбирается из переразмеренного КНД и подогревается в рекуператоре, а далее срабатывается в воздушной утилизационной турбине, создавая на валу дополнительную полезную мощность (рис.3,а). При этом в качестве переразмеренного КНД можно использовать уже выполненный КНД серийного, двигателя большей мощности, как и турбокомпрессор высокого давления ГТД меньшей мощности. Переделке подвергается лишь одноступенчатая турбина низкого давления и опоры, а также конструируются вновь подводящие – отводящие улитки. По такой схеме выполнены в РФ проекты ГТУ ПС-27 и ПС-30 с КПД, равным 45% [4].

При создании двигателя мощностью 16 МВт в качестве переразмеренного КНД можно использовать, например, первые четыре или пять ступеней КНД серийного ГТД ДГ90, разработки ГП НПКГ «Зоря-Машпроект» ($G_B=72$ кг/с), а в качестве базового ГТД выбрать современный малогабаритный ГТД UGT 10000 ($G_B=37$ кг/с) с переделанной турбиной низкого давления. Утилизационную воздушную турбину также можно

подобрать из готовых турбин какого-либо ГТД, изготавливаемого на предприятии. Вследствие небольших габаритных размеров UGT 10000 воздушная турбина может быть скомпонована на общей подмоторной раме.

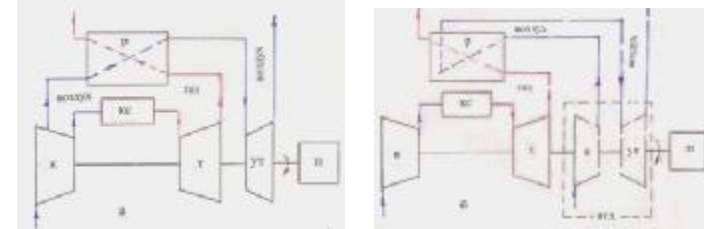


Рис. 3 – Перспективные схемы ГТУ-УТ (а) и ГТУ-ВТД (б) для КС: Р – рекуператор; П – потребитель мощности

При второй схеме (ГТУ - ВТД) с воздушной утилизацией выхлопные газы в рекуператоре подогревают воздух, отбираемый не из-за переразмеренного КНД, а воздух от независимого компрессора ВТД, вынесенного во вне (рис.3,б). Подогретый воздух приводит во вращение воздушную утилизационную турбину, создающую дополнительную мощность к мощности, вырабатываемой газовой свободной турбиной. Данная схема реализуется в России в металле (ГТУ ГТ-050М), и КПД энергоустановки составляет $\approx 48\%$.

Для проектируемого ГТД мощностью 16 МВт можно использовать, практически, без переделки, серийный ГТД, например, ДО 90 ($N=14700$ кВт, КПД 33%), с возможной работой его на дроссельном режиме и пониженным расходом топливного газа. Дополнительную мощность генерирует ВТД. Лопаточные аппараты ВТД также можно подобрать из серийно изготавливаемых деталей на предприятии, что и сделано в ГТ-050М. Это значительно удешевит разработку и производство установки.

Рассмотренные две утилизационные схемы обладают существенными, по сравнению с ГТУ-Р, газодинамическими преимуществами – благоприятным протеканием различных характеристик. На рис.4 показано сравнение рассчитанных с помощью математической модели дроссельных характеристик для ГТУ простого цикла, ГТУ-Р, ГТУ-УТ и ГТУ-ВТД.

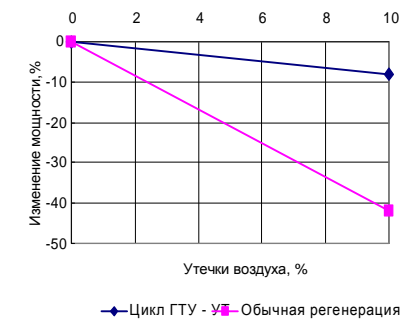
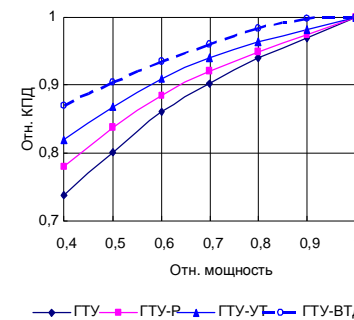


Рис. 4 – Дроссельные характеристики Рис. 5 – Влияние утечек воздуха на мощность

Из рисунка следует, что при достаточно глубоком дросселировании двигателя ($\bar{N} = 40\%$) КПД ГТУ простого цикла уменьшается на 27%, а ГТУ-ВТД – всего лишь на 12%, что свидетельствует об эксплуатационных преимуществах рассматриваемой схемы.

Результаты расчетных исследований, приведенные в работе [4], свидетельствуют о том, что при 10% утечках воздуха мощность ГТУ-Р уменьшается более, чем на 40%, в то время, как для ГТУ-УТ такое снижение не превышает и 10% (Рис.5).

Кроме того, в схемах ГТУ-УТ и ГТУ-ВТД эффективный КПД в значительно меньшей степени зависит от степени регенерации и утечек воздуха в рекуператоре, так как расход топлива не зависит от величины ϵ . Это способствует сохранению основных характеристик в процессе эксплуатации при естественном ухудшении параметров рекуператора.

Существенно более низкие значения температуры газов (на $\sim 150^0$) и давления воздуха на входе в рекуператор по сравнению с обычным регенеративным циклом (ГТУ-Р) не только повышает надежность, но и облегчает прочностную доводку относительно «холодного» рекуператора, а также дает возможность использовать менее жаростойкие (более дешевые) материалы, но требует при этом больших размеров рекуператора по холодному контуру [4].

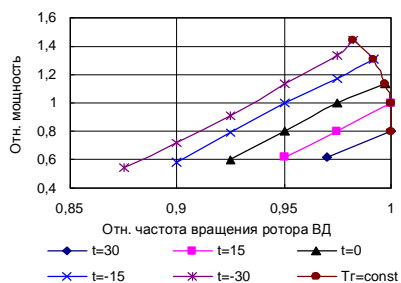


Рис. 6 – Дроссельно-климатическая характеристика

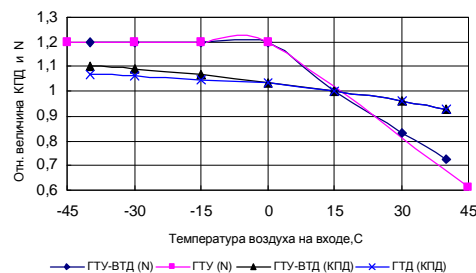


Рис. 7 – Климатическая характеристика

Следует отметить, что климатические характеристики ГТУ простого цикла и ГТУ-ВТД в относительном изображении, практически, одинаковы (Рис.6,7). Подобные результаты получены и для ГТУ-УТ [4]. Это связано с тем, что здесь, при заданном законе регулирования, определяющим фактором является изменение плотности воздуха на входе в двигатель.

Конструктивно ВТД представляет собой внешнюю приставку, с возможностью установки ее на общей раме. Это работает на принцип «модульности» агрегата. При этом ВТД – низкотемпературный модуль,

достаточно простой и надежный агрегат, ротор которого может быть установлен на «сухих» электромагнитных опорах;

В обеих схемах предполагается применение **серийных** базовых ГТД с достаточно высокими степенями повышения давления, соответствующим машинам четвертого поколения ($\pi_k^* = 19...26$). При этом указанные значения π_k^* являются оптимальными в плане получения максимального КПД каждой из схем (ГТУ-УТ и ГТУ-ВТД). В сочетании с рекуператором, имеющим относительно низкую степень регенерации ($\epsilon = 0,75...0,8$), можно достичь не только высокой экономичности установки, но и обеспечить оптимальную площадь всего оборудования в плане наиболее выгодного использования помещений реконструируемых КС.

К недостаткам указанных схем следует отнести относительно длинный валопровод внешней мощности (особенно в ГТУ-ВТД), что создаст определенные трудности в обеспечении прочностных характеристик.

Сравнительные экономические оценки показывают, что замена приводного двигателя третьего поколения UGT 16000 ($N_{e\text{ уд}} \approx 165$ кВт·с/кг, $\eta_e = 0,31$) в базовом классе использования ГПА на ГТУ-УТ ($N_{e\text{ уд}} \approx 250$ кВт·с/кг, $\eta_e = 0,45$) или ГТУ-ВТД ($N_{e\text{ уд}} \approx 430$ кВт·с/кг, $\eta_e = 0,48$) получить годовой экономический эффект более \$ 3 млн. При замене устаревшего двигателя ГТК-25 эффект может составить более \$ 9 млн. Увеличение удельной мощности установки будет способствовать сохранению или незначительному увеличению площади, занимаемой оборудованием на реконструируемой КС.

Решение о выборе термодинамической схемы ГТУ в конечном итоге может быть только на основе анализа стоимости жизненного цикла с учетом динамики соотношения цен на топливо и оборудование.

Список литературы: 1.Елисеев Ю.С., Коваль В.А., Тарелин и др. Взаимовыгодное сотрудничество – надежный путь создания газотурбинного двигателя нового поколения//Крылья Родины. Национальный авиационный журнал: Москва. Октябрь-ноябрь 2007. – С.32-37. 2. Аникин Д.В., Балабанов А.П.и др. Возможные причины повреждаемости лопаточного аппарата компрессора ГТУ MS5002B после модернизации переводом на регенеративный термодинамический цикл//Компрессорная техника и пневматика.-Москва.- №7, 2006.-С. 14-17. 3.Боршанский В.М. Исследования и разработки ЦИАМ по повышению эффективности ГТУ// Конверсия в машиностроении: Москва. – № 4-5, 2005.-С.32-38. 4.Иноземцев А.А.,Сулимов Д.Д. и др. ГТУ-27ПС–перспективный газотурбинный привод сложного цикла//Газотурбинные технологии. - Рыбинск.-№4 (39), 2005. – С.2-7.

Поступила в редколлегию 15.05.2008