

Дикий Н.А., Соломаха А.С., Суздальская Е.И.

Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев

Газопаротурбинная технология «Водолей» для совместного производства электрической и тепловой энергии

Проведен анализ работы газопаротурбинной технологии «Водолей» в режиме совместного производства электрической и тепловой энергии. Рассмотрена возможность увеличения производства тепловой энергии за счет дополнительного подогрева сетевой воды отобранном паром из котла-утилизатора. Проанализирована возможность получения и использования в цикле газопаротурбинной технологии «Водолей» избыточной насыщенной воды для увеличения выработки тепловой энергии. Проведено сравнение технологии «Водолей» с наиболее распространенными технологиями совместного производства тепловой и электрической энергии.

Ключевые слова: газопаротурбинная технология «Водолей», избыточная насыщенная вода, совместное производство электрической и тепловой энергии.

Проведено аналіз роботи газопаротурбінної технології «Водолій» у режимі спільного виробництва електричної та теплової енергії. Розглянуто можливість збільшення виробництва теплової енергії за рахунок додаткового підігріву мережної води паром, яка відбирається з котла-утилізатора. Проаналізовано можливість отримання та використання у циклі газопаротурбінної технології «Водолій» надлишкової насиченої води для збільшення виробництва теплової енергії. Зроблено порівняння технології «Водолій» з найбільш розповсюдженими технологіями спільного виробництва теплової та електричної енергії.

Ключові слова: газопаротурбінна технологія «Водолій», надлишкова насичена вода, спільне виробництво електричної та теплової енергії.

Альтернативой стремительному росту стоимости топливных ресурсов является уменьшение их потребления в процессах производства электрической и тепловой энергии вследствие использования современных высокоэффективных технологий. Именно такая газопаротурбинная технология «Водолей» (ГПТТ «Водолей») создана в Украине. Она базируется на принципиально новых научных и технических решениях, которые обеспечивают резкое сокращение затрат топливных ресурсов и низкое загрязнение окружающей среды (выбросы наиболее канцерогенных поллютантов NO_x снижаются в 2,5 раза по сравнению с мировыми нормами, выбросы парникового газа уменьшаются на 21–23 %). Кроме того, она требует низких капитальных вложений, которые в 1,5–2 раза меньше, чем у существующих технологий аналогичного направления. Конструктивное решение газопаротурбинной установки «Водолей» электрической мощностью 15,3 МВт показано на рис.1.

Ее первый промышленный образец по решению Государственной межведомственной ко-

миссии внедрен в конце 2003 г. в опытную эксплуатацию в качестве привода газоперекачивающего агрегата на компрессорной станции Ставищенская магистрального газопровода «Уренгой — Ужгород», что позволило значительно сократить затраты природного газа на его транспортировку. Сравнение ГПТУ «Водолей» с серийным газотурбинным агрегатом ГПУ-16, который имеет ту же электрическую мощность, представлено в табл.1.

Исходя из полученных результатов, решением Государственной межведомственной комиссии от 18 ноября 2005 г. опытный образец ГПТТ «Водолей» введен в серийную эксплуатацию, ему присвоен № 1 и предложено промышленности приступить к его серийному производству для переоснащения газотранспортной системы Украины. Если на компрессорных станциях Украины газотурбинные приводы газоперекачивающих агрегатов заменить на ГПТТ «Водолей», то расход природного газа на его транспортировку уменьшится на 2,5–3 млрд м^3 /год.

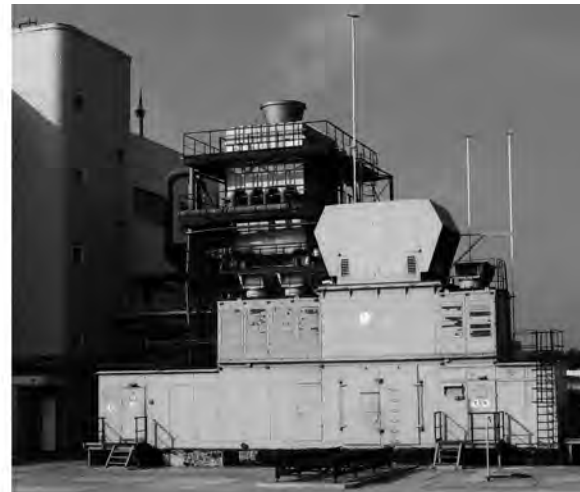
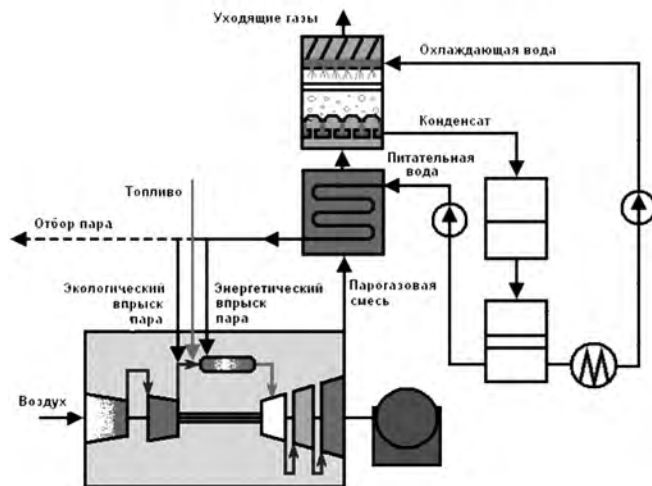


Рис.1. Тепловая схема и общий вид ГПТУ «Водолей» на Ставищенской компрессорной станции.

Хорошие результаты в деле экономии природного газа достигаются также при использовании технологии «Водолей» для совместного производства электрической и тепловой энергии, то есть при ее работе в когенерационном режиме. Так, при температуре внешней среды $-1,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ технология «Водолей» способна производить около 3,6 МВт тепловой энергии.

Кроме того, можно увеличить тепловую мощность установки за счет дополнительного подогрева сетевой воды отобранным паром из котла-утилизатора. При этом можно реализовать два режима подогрева.

В первом варианте отбор пара осуществляется в количестве, которое обеспечивает сохранение номинальной электрической мощности установки (15,3 МВт), при этом тепловая мощность составляет 8,5 МВт. При средней температуре воздуха отопительного сезона $-1,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ электрический КПД технологии «Водолей» составляет 40,4 %, а коэффициент использования теплоты топлива (КИТ) достигает 55,6 %.

Во втором случае осуществляется отбор пара до 10 т/ч, что позволяет получить тепловую мощность около 10 МВт, но при этом уменьшается электрическая мощность газотурбинного двига-

теля (ГТД) до 12,34 МВт, то есть на 3 МВт. При той же температуре окружающей среды $-1,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ коэффициент использования топлива повышается до 66,8 %. Правда, при этом электрический КПД энергоустановки уменьшается с 40,4 до 36,8 %.

Несмотря на такие неплохие показатели у технологии «Водолей» есть существенные резервы и возможности дальнейшего увеличения производства тепловой энергии и экономии топливных ресурсов, в частности, природного газа.

Температура отработавших газов после котла-утилизатора парогазовых установок, в том числе после котла-утилизатора ГПТУ «Водолей», остается достаточно высокой. Так, для одноконтурных котлов эта температура равна $160\text{--}170\text{ }^{\circ}\text{C}$, что приводит к значительным выбросам тепловой энергии, которая в принципе способна превращаться в работу. Для газопаротурбинных технологий эта проблема решается применением двух- и трехконтурных котлов-утилизаторов, то есть котлов двух и трех уровней, но такое решение значительно увеличивает габариты и стоимость энергоустановки. Такой метод углубленной утилизации теплоты отработавших газов не решает проблему полностью, так как переход от одноконтурных к двухконтурным энергоустановкам увеличивает КПД всего на 0,7 %, а переход к трехконтурным увеличивает его только на 0,16 % [1]. При этом температура отработавших газов даже за контуром третьего давления остается $110\text{--}115\text{ }^{\circ}\text{C}$ [2, 3]. Такой уровень температур связан с высокой необратимостью термодинамических процессов утилизации теплоты в котле-утилизаторе. В связи с этим целесообразно рассмотреть и определить причины их возникновения.

Проведенный в работе [4] анализ показал, что значительного уменьшения необратимости

Таблица 1. Сравнение технологии «Водолей» и ГПУ-16

Показатель	«Водолей»	ГПУ-16
КПД, %	42,16	30
Расход топливного газа, кг/ч	2700	3836
Температура выхлопных газов, $^{\circ}\text{C}$	45	450
Содержание выхлопных газов:	1920	2480
CO_2 , г/с		
CO, мг/м ³	55	150
NO_x , мг/м ³	40	140

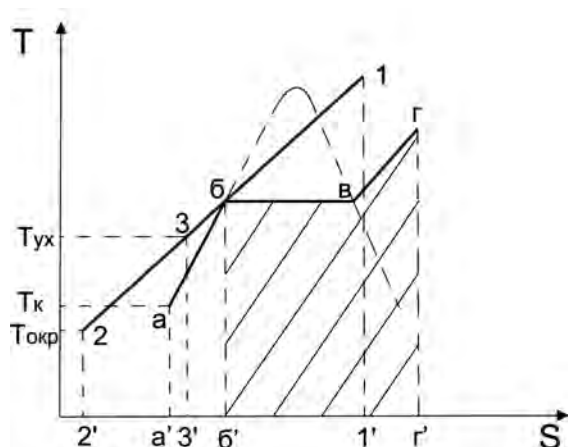


Рис.2. T-S диаграмма процесса утилизации теплоты в котле-утилизаторе.

можно достичь за счет производства и использования в цикле установки избыточной насыщенной воды.

Необратимость процесса утилизации теплоты отработавших газов на экономайзерном участке будет тем больше, чем больше разность температур между греющим теплоносителем (отработавшими газами) и нагреваемым (водой). Это наглядно подтверждается рис.2, на котором изображен процесс утилизации теплоты в котле-утилизаторе ПТУ «Водолей».

Из него видно, что нагревание воды от температуры $T_k \approx 60$ °С (температура сконденсированной в контактном конденсаторе воды) до состояния насыщения и перегрев полученного пара происходят по линии а-б-в-г. В связи с этим количество использованной теплоты на нагрев воды, ее испарение и перегрев характеризуется площадью г-г'-а'-а-б-в-г. Охлаждение отработавших газов происходит по линии 1-2. При этом на выходе из котла-утилизатора уходящие газы имеют температуру $T_{yx} \approx 170$ °С (точка 3), и уже после этого охлаждаются до температуры окружающей среды (точка 2).

Количество израсходованной теплоты на нагрев воды характеризуется площадью

1-1'-3'-3-1. Причем использование этой теплоты будет тем полнее, чем ближе водяные эквиваленты отработавших газов и нагреваемой воды, а при полном использовании теплоты отработавших газов должно выполняться условие:

$$W_B = W_G,$$

где W_B — водяной эквивалент нагреваемой в котле-утилизаторе воды; W_G — водяной эквивалент греющей газопаровой смеси в котле-утилизаторе.

Учитывая, что изобарная теплоемкость отработавших газов $C_{pг} \approx 1,26$ кДж/(кг·К), а для ПТУ «Водолей» отношение $G_B/G_G \approx 0,121$, то $W_G = 1,26$ кДж/(с·К); $W_B = 4,18 \cdot 0,121 = 0,52$ кДж/(с·К).

Из полученных значений видно, что водяные эквиваленты отработавших газов и воды в котле-утилизаторе различаются в 2,4 раза. По этой причине забираемая водой теплота на участке ее нагрева до температуры насыщения в 2,4 раза меньше имеющейся в отработавших газах. В связи с этим нагрев воды в процессе а-б сопровождается большими необратимыми потерями, которые существенно уменьшают количество утилизированной теплоты уходящих газов из котла-утилизатора газопаротурбинной установки.

Из вышеизложенного можно сделать вывод, что для более полного использования теплоты отработавших газов необходимо увеличить расход воды через экономайзер котла-утилизатора по сравнению с количеством генерируемого пара. В результате протекание процесса а-б приблизится к процессу б-3, количество утилизированной теплоты увеличится, а температура отработавших газов в точке 3 приблизится к температуре воды на входе в экономайзер котла-утилизатора (точка а). Исходя из приведенных расчетов, для полной утилизации теплоты отработавших газов необходимо, чтобы расход воды через экономайзер превышал расход испаренной в испарителе воды в 2,4 раза. Этого можно достичь, если предусмотреть отбор избыточной насыщенной воды за экономайзером котла-утилизатора и использовать ее в цикле для производства тепловой энергии на отопление и горячее водоснабжение. При этом количество теплоты на отопление и горячее водоснабжение равно соответственно 11,1 и 7 МВт, а суммарное производство тепловой энергии будет составлять 18,1 МВт, что на 7,6 МВт больше суммарного производст-

Таблица 2. Сравнение ПТУ «Водолей» с другими технологиями

Технико-экономический показатель	«Водолей»	Паротурбинная технология*	Газотурбинная когенерация**
Расход природного газа, м ³ /ч	2980	2980	2980
Производство энергии, МВт:			
электрической	12,3	6,6	9,9
тепловой	18,1	20,2	12,9
Электрический КПД, %	37,2	30	33,4
Коэффициент использования топлива, %	92	68	76,9

* Действующая в стране паротурбинная технология. ** Когенерационная установка типа UGT10000С производства ГП НПКГ «Заря-Машпроект».

ва тепловой энергии без использования избыточной насыщенной воды.

В табл.2 проведено сравнение эффективности технологии «Водолей» в когенерационном режиме с наиболее распространенными технологиями совместного производства электрической и тепловой энергий.

Выводы

Показана возможность увеличения количества производства тепловой энергии при сохранении номинальной электрической мощности газопаротурбинной установки «Водолей» при температуре окружающей среды $-1,1$ °С и выше.

Разработаны тепловая схема газопаротурбинной установки и дополнительный термодинамический процесс, которые позволяют отобрать пар на выходе из пароперегревателя котла-утилизатора и использовать его для увеличения количества производимой тепловой энергии при снижении температуры окружающей среды.

Показано, что технология «Водолей» может существенно увеличить количество произведенной тепловой энергии за счет использования избыточной насыщенной воды в цикле в ре-

зультате ее отбора за экономайзером котла-утилизатора.

Проанализировано и сделано сравнение эффективности работы технологии «Водолей» с другими газопаротурбинными технологиями в режиме совместного производства электрической и тепловой энергии в условиях ТЭЦ.

Список литературы

1. Березенец П.А., Васильев М.К., Костин Ю.А. Анализ схем бинарных ПГУ на базе перспективной ГТУ // Теплоэнергетика. — 2001. — № 5. — С. 18–30.
2. Радин Ю.А., Давыдов А.В., Малахов С.В и др. Опытное определение технико-экономических показателей блоков ПГУ-39 Сочинской ТЭЦ // Электр. станции. — 2006. — № 6. — С. 13–19.
3. Радин Ю.А. Освоение первых отечественных бинарных парогазовых установок // Теплоэнергетика. — 2006. — № 7. — С. 4–13.
4. Дикий М.О., Уваричев О.М., Соломаха А.С. Новітня газопаротурбінна технологія «Водолей» для виробництва механічної (електричної) і теплової енергії та її впровадження в енергетичному комплексі України // Енергетика, економіка, технології, екологія. — 2009. — № 1. — С. 16–19.

Поступила в редакцию 21.03.11

Dikiy M.O., Solomakha A.S., Suzdalskaya E.I.

National Technical University of Ukraine «KPI», Kiev

Gas-Steam Turbine Technology «Aquarius» for Combined Electrical and Heat Energy Generation

The analysis of gas turbine technology «Aquarius» in regime of combined generation of electric and thermal energy is conducted. The possibility of thermal energy production increase by additional system water heating by steam from the heat-recovery boiler is considered. The possibility of obtaining and application in gas turbine technology «Aquarius» cycle excess saturated water for heat energy production increase is analysed. The comparison of «Aquarius» technology with the most widespread technologies of co production of thermal and electric energy is conducted.

Key words: gas-steam turbine technology «Aquarius», excess saturated water, combined electrical and heat energy generation.

Received March 21, 2011