

УДК 621.643

А.Н. РАДЧЕНКО, А.С. МОРОЗОВА

Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова, Украина

БЫСТРООКУПАЮЩИЕСЯ ПРОЕКТЫ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ КОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЙ

Дано обоснование технических решений в основе быстроокупающихся проектов модернизации газотурбинных двигателей компрессорных станций с применением технологий испарительного охлаждения наружного воздуха на входе газотурбинных двигателей. Показано, что внедрение таких энерго-сберегающих технологий следует рассматривать в качестве первого этапа реализации концепции самоокупающихся проектов полной модернизации компрессорных станций. Высокая эффективность технологий сохраняется при эксплуатации станций и после завершения их модернизации.

Ключевые слова: компрессорная станция, газотранспортная система, газотурбинный двигатель, мощность, топливный газ, испарительное охлаждение воздуха.

1. Состояние проблемы, постановка цели исследования

Газотранспортная система Украины включает 72 компрессорные станции (КС) с общим числом газотурбинных двигателей (ГТД), приводящих газоперекачивающие компрессоры, свыше 440. Значительный физический и моральный износ оборудования большинства КС требует огромных капиталовложений на его замену и модернизацию, непосильных для экономики страны. Привлечение же крупных зарубежных инвестиций рассматривается, и не без оснований, как угроза экономической безопасности государства из-за потери права собственности на такую базовую отрасль экономики, как газотранспортная система, либо долговой ямы на десятилетия, перспективы выбраться из которой весьма призрачны.

Из-за значительных тепловых потерь с отработавшими газами, превышающих половину первичной энергии сжигаемого топлива, работа большинства ГТД характеризуется крайне низкой эффективностью. Использование же части теплоты отработавших газов в утилизационных пароводяных котлах (УК) ограничивается собственными потребностей КС: обогрев аппаратов очистки транспортируемого газа, систем подачи и хранения смазочного масла, топливного и пускового газов, нагрев воздуха в системах антиобледенения ГТД и вентиляции, воды систем отопления зданий и укрытий двигателей. Объемы расходования тепловой энергии на эти цели настолько незначительны, не говоря уже об их сезонном характере, что не оказывают заметного

влияния на энергетический баланс газоперекачивающих агрегатов (ГПА). Следствием неэффективной эксплуатации ГТД являются большие расходы топливного газа, сжигаемого в двигателях, составляющие около 5 % транспортируемого газа.

Особенно низкая эффективность эксплуатации КС в теплое время, когда из-за пониженной плотности транспортируемого газа, охлаждаемого в теплообменниках наружным воздухом, сокращается производительность КС. Причиной ее снижения является также падение мощности ГТД. Так, при повышении температуры наружного воздуха на входе ГТД от 15 °С до 35 °С мощность ГТД простого цикла снижается до 75% номинальной, а эффективный КПД – на 3% [1].

Таким образом, **проблема** повышения мощности ГТД ГПА и, следовательно, производительности КС стоит весьма остро, а соответствующая их модернизация в условиях дефицита финансовых ресурсов должна осуществляться в сжатые сроки и без значительных капиталовложений. Очевидно, что в основе таких быстроокупающихся проектов энергетической модернизации КС должны лежать эффективные технические решения, не требующие коренной реконструкции действующих ГПА и, соответственно, значительных капитальных затрат.

Цель исследования – обоснование технических решений в основе быстроокупающихся проектов модернизации КС, обеспечивающих увеличение мощности ГТД, особенно при повышенных температурах наружного воздуха, когда производительность КС резко снижается.

2. Обоснование технических решений в основе быстроокупающихся проектов повышения мощности ГТД компрессорных станций

Малозатратные, с минимальными сроками окупаемости, проекты модернизации ГТД ГПА, должны обеспечивать существенную экономию топливного газа, покупаемого Украиной по мировым ценам, а значит и быстрое накопление финансовых ресурсов для последующей, требующей значительных капитальных затрат, реконструкции ГПА [2 – 4]. Их следует рассматривать как первый этап реализации более общей концепции самоокупающихся проектов полномасштабной реконструкции газотранспортной системы [4]. Исходя из такой постановки проблемы технического перевооружения ГПА, технические решения, реализованные на этапах частичной модернизации КС, должны оставаться эффективными и на последующих этапах реконструкции КС, вплоть до замены физически и морально устаревших ГТД современными высокоэкономичными когенерационными и тригенерационными газотурбинными и газопаротурбинными установками (ГТУ и ГПТУ). С учетом важности проблемы реконструкции ГПА газотранспортной системы для экономики страны и масштабов такой реконструкции одним из основных критериев на этапе принятия технических решений должно быть подтверждение их эффективности мировой практикой эксплуатации с учетом особенностей эксплуатации ГТД КС – удаленности КС от населенных пунктов и отсутствия потребителей тепловой энергии.

Единственным способом демпфирования отрицательного воздействия на мощность и топливную экономичность ГТД повышенной температуры наружного воздуха на их входе является снижение той самой температуры. Наибольшее применение в ГТД получило испарительное охлаждение воздуха, при котором вода под высоким давлением впрыскивается форсунками тонкого распыла в поток наружного воздуха на входе ГТД [5]. Впрыск воды на всасывание компрессоров авиационных двигателей широко используется в летной практике для увеличения тяги двигателей с целью быстрого взлета в жаркие дни.

В зависимости от количества впрыскиваемой воды возможны два варианта испарительного охлаждения воздуха: предварительное охлаждение с испарением всей впрыскиваемой воды за счет теплоты, отводимой от наружного воздуха до его всасывания компрессором (увлажнение воздуха до состояния насыщения, т.е. относительной влажности $\phi = 100\%$) и внутреннее (при сжатии в компрессоре) испарительное охлаждение, когда избыточная, сверх

насыщения, влага доиспаряется в процессе повышения давления и соответственно температуры воздуха в компрессоре. Эффект от предварительного испарительного охлаждения состоит в снижении температуры воздуха перед компрессором до температуры по мокрому термометру (при $\phi = 100\%$). При внутреннем испарительном охлаждении воздуха с отводом от него теплоты на испарение капельной влаги процесс повышения давления и температуры воздуха при сжатии в компрессоре приближается к изотермическому, следствием чего является уменьшение удельной работы сжатия компрессора ГТД и увеличение полезной мощности ГТД.

Схема ГТД с охлаждением наружного воздуха путем впрыска в него воды представлена на рис. 1.

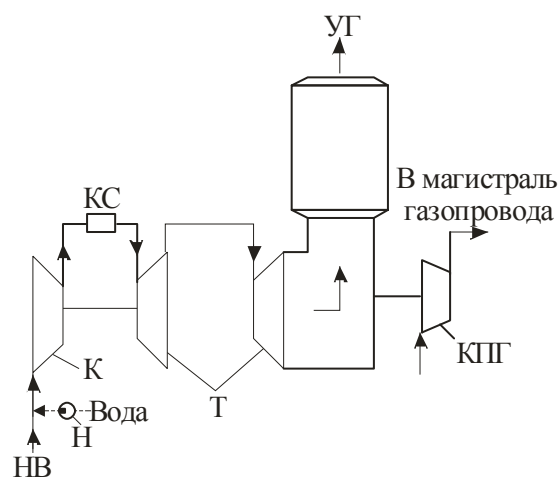


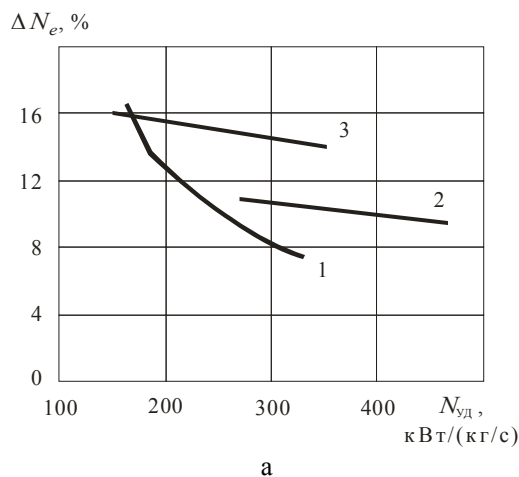
Рис. 1. Схема ГТД с впрыском воды в наружный воздух на входе компрессора:

К – компрессор воздушный; КС – камера сгорания; Т – турбина; КПГ – компрессор перекачки природного газа; Н – насос; НВ – наружный воздух; УГ – уходящие газы

На рис. 2, а приведены данные [5] по приращению мощности ΔN_e ГТД за счет предварительного испарительного охлаждения воздуха до состояния насыщения (до относительной влажности $\phi = 100\%$) в зависимости от удельной, приходящейся на единицу расхода воздуха, мощности $N_{уд}$ базовых двигателей (без впрыска воды), получаемой при параметрах ISO: $t_{нв} = 15^\circ\text{C}$ и относительной влажности $\phi = 40\%$. Удельная мощность: $N_{уд} = N_e / G_{в}$, где N_e – эффективная мощность ГТД, т.е. мощность на валу ГТД (за вычетом мощности на привод воздушных компрессоров ГТД), используемая для привода газоперекачивающих компрессоров; $G_{в}$ – расход воздуха. При этом воду впрыскивали в количестве, необходимом для увлажнения воздуха до состояния насыщения ($\phi = 100\%$), т.е. осуществляли впрыск без избытка воды. В результате наружный воздух охлаждался от его исходных параметров: $t_{нв} = 40^\circ\text{C}$

и $\phi = 40\%$, до его температуры по мокрому термометру $t_m = 27^\circ\text{C}$ (при $\phi = 100\%$). Приращение мощности ΔN_e , %, рассчитывалось относительно ее значения при исходной температуре $t_{нв} = 40^\circ\text{C}$.

На рис. 2, б представлены приращения мощности ΔN_e ГТД за счет внутреннего (при сжатии увлажненного воздуха в компрессоре) испарительного охлаждения воздуха при впрыске воды с избытком (сверх ее количества, необходимого для увлажнения воздуха до состояния насыщения) в количестве 2% от массового расхода воздуха в зависимости от тем-



пературы газов на входе в турбину t_3 (на выходе из камеры сгорания), которая определяет эффективность термодинамического цикла ГТД.

Данные на рис. 2 получены авторами работы [5] для массива из 67 ГТД ведущих фирм-изготовителей, включающего все три категории ГТД: традиционные стационарные ГТД с температурой газов на входе в турбину $t_3 < 1200^\circ\text{C}$; усовершенствованные стационарные ГТД с температурой газов $t_3 > 1200^\circ\text{C}$; конвертированные для стационарного применения авиационные ГТД.

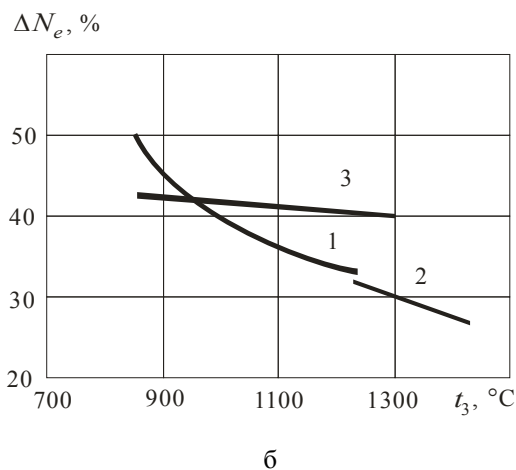


Рис. 2. Увеличение мощности ГТД ΔN_e за счет охлаждения наружного воздуха впрыском воды в зависимости от удельной мощности $N_{уд}$ базового ГТД (а) и от температуры газов на входе в турбину t_3 (б) при разных количествах впрыскиваемой воды [5]:

а — впрыск воды без избытка; б — впрыск воды с избытком в количестве 2% от массового расхода воздуха; 1 — традиционные стационарные ГТД ($t_3 < 1200^\circ\text{C}$); 2 — усовершенствованные стационарные ГТД ($t_3 > 1200^\circ\text{C}$); 3 — конвертированные авиационные ГТД

Как видно, во всем диапазоне мощностей ГТД наибольшее приращение мощности за счет испарительного охлаждения воздуха имеет место в конвертированных авиационных ГТД: $\Delta N_e = 14...16\%$ при впрыске воды без ее избытка (рис. 2, а) и $\Delta N_e = 40...42\%$ при впрыске воды с избытком в количестве 2% (рис. 2, б). Значительное повышение мощности за счет впрыска воды происходит и в традиционных стационарных ГТД: $\Delta N_e = 8...16\%$ при впрыске воды без избытка (рис. 2, а) и $\Delta N_e = 30...50\%$ при впрыске воды с избытком (рис. 2, б), что соответствует ГТД отечественных КС. Эффективность впрыска воды остается достаточно высокой и для современных усовершенствованных стационарных ГТД: $\Delta N_e \approx 10\%$ при впрыске воды без избытка (рис. 2, а) и $\Delta N_e = 27...32\%$ при впрыске воды с избытком (рис. 2, б), т.е. и после реконструкции отечественных КС с полной заменой устаревших ГТД современными высокоэкономичными ГТД.

Об экономии топлива в результате применения испарительного охлаждения наружного воздуха на входе ГТД путем впрыска воды без избытка

($\phi = 100\%$) и с избытком (сверх ее количества, необходимого для увлажнения воздуха до состояния насыщения) в количестве 2% от массового расхода воздуха можно судить по приведенным на рис. 3 данным [5] по сокращению потребления топлива ΔG_T двигателями.

Как видно, экономия топлива G_T за счет испарительного охлаждения воздуха на входе ГТД весьма существенная и составляет для конвертированных авиационных ГТД: $\Delta G_T = 9...10\%$ при впрыске воды без избытка (рис. 3, а) и $\Delta G_T = 22...28\%$ при впрыске воды с избытком в количестве 2% (рис. 3, б); в традиционных стационарных ГТД: $\Delta G_T = 7...9\%$ при впрыске воды без избытка (рис. 3, а) и $\Delta G_T = 21...26\%$ при впрыске воды с избытком (рис. 3, б); для современных усовершенствованных стационарных ГТД: $\Delta G_T \approx 5\%$ при впрыске воды без избытка (рис. 3, а) и $\Delta G_T \approx 20\%$ — с избытком (рис. 3, б).

Таким образом, реализация первого этапа модернизации ГТД КС с внедрением технологий испарительного охлаждения наружного воздуха на входе двигателей позволит сократить потребление топ-

ливного газа на 20...25 %, что при его доле около 5 % в общем объеме транспортируемого газа составит внушительную величину (около 1 млрд гривен) и

обеспечит быстрое накопление денежных средств для последующей реконструкции ГПА всей газотранспортной системы.

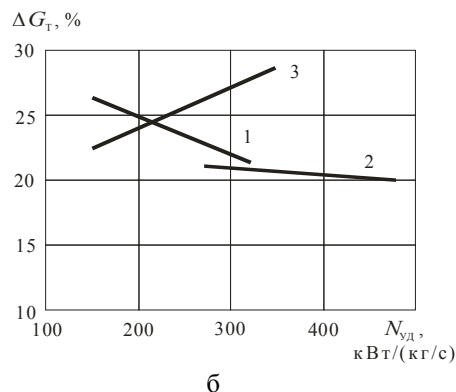
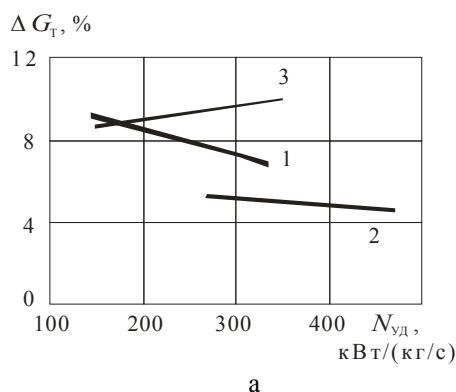


Рис. 3. Экономия потребления топлива ГТД ΔG_t за счет охлаждения наружного воздуха впрыском воды в зависимости от удельной мощности $N_{уд}$ базового ГТД при разных количествах впрыскиваемой воды [5]: а – впрыск воды без избытка; б – впрыск воды с избытком в количестве 2 % от массового расхода воздуха; 1 – традиционные стационарные ГТД; 2 – усовершенствованные стационарные ГТД; 3 – конвертированные авиационные ГТД

Внедрение таких технологий не связано с заметным усложнением действующих ГПА и сводится к установке насосов высокого давления, 120...140 бар, для подачи деминерализованной воды в систему форсунок тонкого распыла, а также дренажного коллектора для отвода неиспарившейся воды из форсуночной камеры на входе компрессора ГТД, что не требует значительных капитальных затрат и окупается в течение одного летнего сезона. При этом должна быть предусмотрена система автоматизированного управления впрыском, обеспечивающая безопасную эксплуатацию ГТД.

Такие технологии нашли широкомасштабное применение в мировой энергетике: количество ГТД, в которых они используются, исчисляется тысячами [5]. Их высокая эффективность подтверждена длительной практикой эксплуатации в разных климатических условиях.

Поскольку надежность эксплуатации ГТД повышается с уменьшением количества впрыскиваемой воды, то ее количество можно сократить вдвое в случае комбинированного применения испарительного внутреннего охлаждения воздуха на входе компрессора ГТД и предварительного поверхностного его охлаждения теплоиспользующими холодильными машинами, утилизирующими теплоту продуктов сгорания, имеющих достаточно высокую температуру [3, 4].

Следует подчеркнуть, что технологии испарительного и комбинированного охлаждения воздуха на входе двигателей будут обеспечивать значительную экономию топливного газа – примерно на 20% – и после реконструкции отечественных КС с полной

заменой устаревших ГТД современными высокоэкономичными ГТД.

Выводы

1. Дано обоснование технических решений в основе быстрокупающихся проектов модернизации КС.
2. На основании известных информационных данных показано, что технологии испарительного охлаждения наружного воздуха на входе ГТД обеспечивают экономию потребления топливного газа на 20...25 % на первом, с минимальными капитальными затратами и сроками окупаемости, этапе реализации концепции самокупающихся проектов модернизации КС и на 20 % – в процессе эксплуатации КС после их реконструкции с применением современных ГТД.

Литература

1. Bortmany J.N. Assessment of aqua-ammonia refrigeration for pre-cooling gas turbine inlet air / J.N. Bortmany // *Proceedings of ASME TURBO EXPO 2002*. – Paper GT-2002-30657. – 12 p.
2. Билека Б.Д. Эффективность применения теплоиспользующих холодильных машин в газоперекачивающих агрегатах / Б.Д. Билека, А.Н. Радченко, Н.И. Радченко // *Матеріали I Міжнар. н.-т. конф. "Холод в енергетиці і на транспорті: сучасні проблеми кондиціонування та рефрижерації"*, ч. II ; зб. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2008. – Вип. 3 (420). – С. 85-94.
3. Радченко А.Н. Тригенерация в газотурбинных установках газоперекачивающих станций /

А.Н. Радченко // *Техногенна безпека: наукові праці МДГУ ім. П. Могили.* – Миколаїв, 2008. – Т. 77, Вип. 64. – С. 11-18.

4. Радченко А.Н. Особенности реализации проектов модернизации газоперекачивающих станций в направлении энергосбережения / А.Н. Радченко, А.С. Морозова // *Матеріали I Міжнар. н.-т. конф. "Холод в енергетиці і на транспорті: сучасні про-*

блеми кондиціонування та рефрижерації", ч. II; зб. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2008. – Вип. 3 (420). – С. 169-177.

5. Bhargava R. Parametric analysis of existing gas turbines with inlet evaporative and overspray fogging / R. Bhargava, C.B. Meher-Homji // *Proceedings of ASME TURBO EXPO 2002.* – Paper GT-2002-30560. – 15 p.

Исследование выполнено в рамках гранта Президента Украины (Розпорядження Президента України про призначення грантів Президента України для підтримки наукових досліджень молодих учених на 2009 рік від 16.12.2008 р. № 336/2008-рп).

Поступила в редакцию 21.05.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.Е. Лагутин, Одесская государственная академия холода, Одесса.

ШВИДКООКУПНІ ПРОЕКТИ ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИХ АГРЕГАТИВ КОМПРЕСОРНИХ СТАНЦІЙ

А.М. Радченко, Г.С. Морозова

Представлено обґрунтування технічних рішень щодо проектів модернізації газотурбінних двигунів компресорних станцій, що швидко окупуються, з використанням технологій випаровувального охолодження зовнішнього повітря на вході у газотурбінні двигуни. Показане, що впровадження таких енергозощаджувальних технологій слід розглядати у якості першого етапу реалізації концепції самоокупних проектів повної модернізації компресорних станцій. Висока ефективність технологій зберігається при експлуатації станцій й після завершення їх модернізації.

Ключові слова: компресорна станція, газотранспортна система, газотурбінний двигун, потужність, паливний газ, випаровувальне охолодження повітря.

SHORT TIME BACK RETURN PROJECTS OF INCREASING THE PRODUCTIVITY OF GAS TRANSPORTING UNITS OF COMPRESSOR STATIONS

A.N. Radchenko, A.S. Morozova

The technical decisions in the base of short time back return projects of modernization of gas turbine engines of compressor stations with application of technologies of evaporative cooling of ambient air at the inlet of gas turbine engines have been proved. It was shown that the application of such energy saving technologies should be considered as the first stage of realization of a concept of self paid projects of complete modernization of compressor stations. A high efficiency of technologies is kept during the further performance of stations after their modernization.

Key words: compressor station, gas transporting system, gas turbine engine, power, fuel gas, evaporative cooling of air.

Радченко Андрей Николаевич – канд. техн. наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник Национального университета кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев, Украина, e-mail: andrad69@mail.ru.

Морозова Анна Сергеевна – старший преподаватель кафедры информационных управляющих систем и технологий Национального университета кораблестроения им. адмирала Макарова, Николаев, Украина.