

УДК 621.43.056

Г.Ф. РОМАНОВСКИЙ, д-р техн. наук, С.И. СЕРБИН, д-р техн. наук,
В.Г. ВАНЦОВСКИЙ, В.В. ВИЛКУЛ

*Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова,
Научно-производственный комплекс газотурбостроения "Зоря"–"Машпроект"*

ТЕХНОЛОГИЯ МАЛОЭМИССИОННОГО СЖИГАНИЯ ТОПЛИВ В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Проведено експериментальні дослідження робочого процесу в зонних камерах згоряння газотурбінних двигунів при спалюванні попередньо підготовлених паливоповітряних сумішей. Визначено основні напрямки зменшення емісії оксидів азоту і вуглецю на вихлопі двигунів. Запропоновані конструкції фронтних пристроїв гібридних камер згоряння можуть бути рекомендовані для модернізації існуючих газотурбінних двигунів з метою забезпечення низьких викидів шкідливих компонентів.

Применение газотурбинных установок (ГТУ) – одно из перспективных направлений совершенствования стационарных и транспортных энергетических систем, повышения их экономичности, экологичности и надежности. В связи с этим последнее десятилетие характеризуется особенно интенсивным развитием газотурбостроения в развитых в техническом отношении странах мира, в том числе и в Украине [6].

Важным средством повышения эффективности использования и снижения потребления углеводородных топлив является улучшение эксплуатационных и экологических характеристик технологических установок за счет совершенствования рабочего процесса в их камерах сгорания [1–3, 7].

Известно, что при сжигании органического топлива в камерах сгорания тепловых двигателей в атмосферу вместе с дымовыми газами выбрасываются такие загрязнители как оксиды азота и углерода, несгоревшие углеводороды, сернистый ангидрид (при сжигании серосодержащих видов топлив), зола (при использовании жидких топлив, особенно остаточных), частицы сажи и др. Количество выбросов зависит от характеристик топлива и от технологии сжигания, т.е. от конструкции топливосжигающего устройства и режима горения.

Жесткость международных норм на уровне эмиссии оксидов углерода, азота, несгоревших углеводородов, канцерогенных компонентов, а также дымности вызывает необходимость комплексного решения вопросов экологического совершенствования ГТУ, что предусматривает создание принципиально новых конструкций малотоксичных камер сгорания. Разработка таких устройств осуществляется на основе знаний физико-химических процессов, происходящих в камере сгорания, основными из которых является распыливание, смесеобразование и горение [2, 4, 7]. К сожалению, до настоящего времени недостаточно полно разработаны конструкции так называемых гибридных камер сгорания [4, 7], которые представляют собой комбинацию диффузионной зоны с каналами для предварительного испарения (если топливо жидкое) и перемешивания топлива с воздухом. Такие камеры могут обеспечить значительное сокращение выбросов оксидов азота по сравнению с традиционными системами сжигания при устойчивом и стабильном характере выгорания основной обедненной топливовоздушной смеси.

Современный газотурбинный двигатель – сложное техническое изделие, от которого требуется соответствие большому перечню параметрических, ресурсных и

эксплуатационных требований. Полное удовлетворение ГТД этим требованиям в сочетании с высоким КПД (34...39 %) и обеспечением экологических характеристик ставит перед проектировщиками и конструкторами комплекс ответственных задач.

Нормативный уровень на эмиссию оксидов азота NO_x в Украине и в странах СНГ сегодня ограничен величиной 150 мг/нм^3 (ГОСТ 28775-90), в большинстве стран Европы он составляет $80...100 \text{ мг/нм}^3$. В то же время зарубежные производители стационарных ГТД целевым уровнем установили значение концентрации $\text{NO}_x = 50 \text{ мг/нм}^3$ (25 ppm), что обусловило применение сложных технологий горения бедных предварительно перемешанных топливовоздушных смесей.

Основным потребителем стационарных ГТД на территории стран СНГ являются нефтегазовая промышленность и энергетика, использующие их для привода генераторов и газоперекачивающих агрегатов. Большинство двигателей имеют эффективный КПД $\eta_e = 25...30 \%$ и большие концентрации оксидов азота NO_x и углерода CO на выходе. Увеличение η_e до $34...39 \%$ снижает количество сжигаемого топлива и, соответственно, значительно уменьшает валовой выброс загрязняющих веществ.

Использование новых технологий организации процесса горения позволяет на порядок снизить эмиссию оксидов азота – наиболее токсичного загрязнителя окружающей среды. Такое радикальное уменьшение концентрации NO_x возможно благодаря организации горения бедных предварительно перемешанных топливовоздушных смесей с температурой пламени $1800...1900 \text{ К}$.

Основными проблемами ГТД работающих с малоэмиссионной камерой сгорания (МКС), как следует из анализа многочисленных публикаций [1, 3, 7], являются "проскок" пламени и пульсационное горение. Спектр частот пульсации давления воздуха широк: $130...500$ и $4000...7000 \text{ Гц}$. Сложная система регулирования приводит к сбоям в работе автоматики на переходных режимах во время включения/выключения групп горелок или топливных каналов. В эксплуатации отмечается неустойчивая работа и неудовлетворительный запуск ГТД с МКС при низких температурах воздуха.

Решение задач использования малоэмиссионных камер сгорания имеет первостепенное значение для обеспечения высокой надежности ГТД в течение всего ресурса, который сегодня определяется в $25\ 000$ часов и более.

Для МКС с несколькими зонами горения и несколькими каналами используется сложный алгоритм управления. Он включает расчет температуры пламени в управляемой зоне, контроль величины концентрации NO_x и амплитуды пульсации давления воздуха в камере. В связи с этим значительно увеличивается продолжительность настройки работы камеры сгорания и системы управления (до двенадцати и более часов). Такая настройка повторяется и в процессе эксплуатации, так как модель регулирования очень чувствительна к разбросам режимных параметров. Требуется также наладка двигателя, связанная с местными условиями его эксплуатации.

На Государственном предприятии Научно-производственный комплекс газотурбостроения "Зоря"–"Машпроект" (г. Николаев) на протяжении последних лет реализуется концепция снижения эмиссии вредных веществ путем их "сухого" подавления, т.е. сжигания в камере сгорания ГТД предварительно приготовленных бедных топливовоздушных смесей [5, 6]. Целью настоящих исследований является экспериментальное определение эмиссионных характеристик гибридных камер сгорания газотурбинных двигателей мощностью 25 и 15 МВт , работающих на газообразном углеводородном топливе.

Для газотурбинного двигателя ДН80Л мощностью 25 МВт разработана малотоксичная система сжигания (рис. 1). Основным элементом малотоксичной

системы (камеры) является горелочное устройство, состоящее из двух радиальных завихрителей первого и второго каналов, за которыми расположены кольцевые камеры смешения. Доля воздуха, поступающего через завихритель первого канала, составляет около 15 % от суммарного расхода через жаровую трубу, а через завихритель второго канала – около 65 %. Топливный газ раздается через отверстия, выполненные в полых лопатках радиальных завихрителей первого и второго каналов.

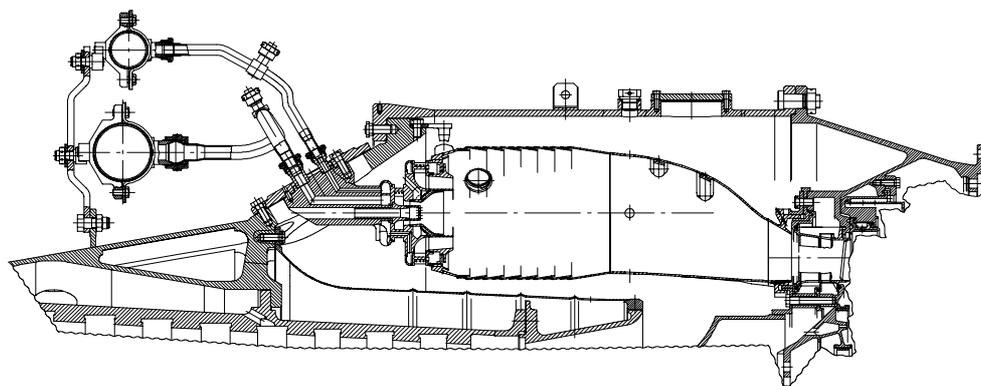


Рис. 1. Конструктивная схема камеры сгорания газотурбинного двигателя

Запуск двигателя и выход на режим $0,1\bar{N}_e$ (где \bar{N}_e – относительная эффективная мощность двигателя) осуществляется подачей топлива только в завихритель первого канала, в котором топливо смешивается с воздухом. Поток через завихритель входит в кольцевую предварительную камеру, где перемешивание завершается прежде, чем он поступит в центральную предкамеру. В этой предкамере горение стабилизируется рециркуляционной зоной.

На режиме запуска двигателя и до режима 10 % нагрузки в завихрителе первого канала готовится богатая гомогенная топливовоздушная смесь, что позволяет на этих режимах поддерживать устойчивое горение в основном объеме камеры при коэффициенте избытка воздуха в зоне горения $\alpha_r = 2,5 \dots 3,5$.

Начиная с режима $0,1\bar{N}_e$ осуществляется подача топлива в завихритель второго канала, в котором начинается подготовка бедной гомогенной топливовоздушной смеси, заканчивающаяся в кольцевой камере смешения. Горение бедной смеси, подготовленной в завихрителе второго канала, стабилизируется горением богатой смеси завихрителя первого канала. На режимах работы двигателя $(0,7 \dots 1,0)\bar{N}_e$ топливо раздается по каналам в соотношении, обеспечивающем требуемые экологические характеристики. Распределение топлива по каналам осуществляется согласно алгоритму в зависимости от температуры воздуха на входе в двигатель и его нагрузки.

Камера сгорания не имеет проблем с "проскоком" пламени и самовоспламенением топлива в смесительном модуле, в ней отсутствует сложный процесс регулирования геометрии. Простота конструкции камеры сгорания и системы автоматического управления обеспечивают низкие затраты на техническое обслуживание ГТД в эксплуатации.

При снижении температуры атмосферного воздуха изменяется состав топливовоздушной смеси и снижается температура воздуха и продуктов сгорания топлива в камере, создавая критическую ситуацию для устойчивости горения. В связи с этим необходимо повышать дозировку топлива по каналам или зонам в МКС.

При конструировании камеры сгорания с технологией низкоэмиссионного сжигания необходимо учесть противоречивые требования на эмиссию NO_x , CO , свободного углерода, радиальную и окружную неравномерности температуры газа на выходе из камеры. Необходимый компромисс достигается в основном за счет совершенствования конструкции смесительного модуля в зоне разбавления.

Экспериментальные стендовые испытания и эксплуатация ГТД показали устойчивость горения во всем диапазоне изменения параметров двигателя. Камера сгорания стабильно запускается в исследованном диапазоне атмосферных температур от -15 до $+30$ °С. На деталях камеры сгорания отсутствуют повреждения, характерные для вибрационного горения. Исследования теплового состояния жаровых труб показали, что ресурс двигателя по сравнению с конструкцией с камерой сгорания традиционного типа не уменьшился. В жаровых трубах при температуре стенок до 850 °С не наблюдается повреждений в виде коробления стенок, прогаров и т.д. Стабильное температурное поле на выходе из камеры сгорания с коэффициентами неравномерности $1,10 \dots 1,35$ позволило обеспечить требуемый ресурс лопаточной части турбины.

На рис. 2 приведены уровни эмиссии основных загрязнителей NO_x и CO на выхлопе ГТД, приведенные к объемной концентрации кислорода 15% в сухой пробе газа. Видно, что при изменении режима работы двигателя от $0,8$ до $1,0 \bar{N}_e$ концентрации оксидов азота практически не изменяются и составляют 70 мг/нм^3 . В настоящее время ведутся работы по уменьшению выбросов NO_x в диапазоне коэффициентов избытка воздуха $3,4 \dots 2,8$ до значения 30 ppm .

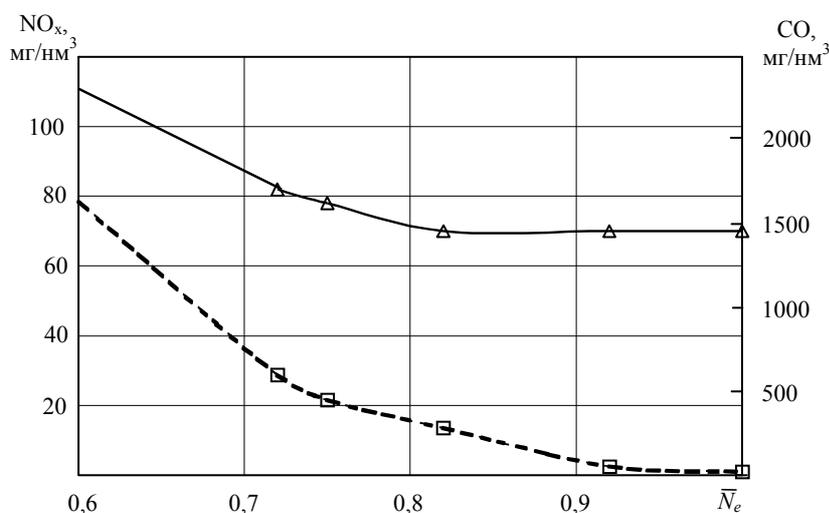


Рис. 2. Экологические характеристики ГТД:
 Δ – NO_x ; \square – CO

Гибридные малотоксичные горелочные устройства обеспечивают высокую надежность работы камер сгорания газотурбинных двигателей в широком диапазоне нагрузок и в различных климатических условиях. Эксплуатация с 1999 года двигателей ДН80Л показала высокую надежность системы "камера сгорания–двигатель", которая обеспечила наработку лидерного ГТД более $15\,000$ часов.

В результате анализа и обобщения результатов теоретических и экспериментальных исследований [1, 3, 5] для проведения опытно-исследовательских работ по улучшению эмиссионных показателей топливосжигающих устройств была

предложена оригинальная конструкция гибридной трубчато-кольцевой камеры сгорания для газотурбинного двигателя мощностью 15 МВт (рис. 3).

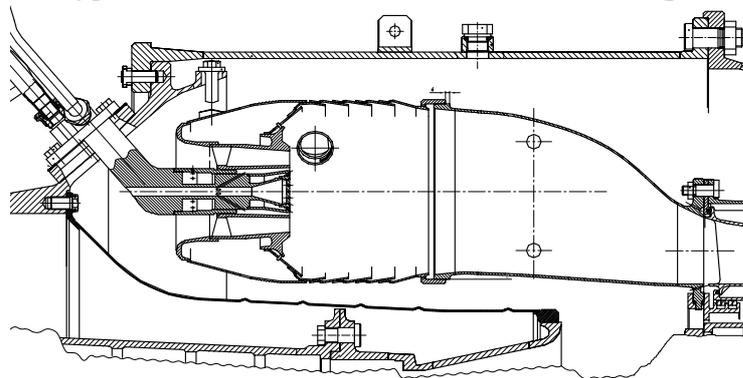


Рис. 3. Конструктивная схема камеры сгорания газотурбинного двигателя мощностью 15 МВт

Особенностью конструкции разработанной камеры является применение во фронтальном устройстве жаровой трубы одного лопаточного завихрителя и двухканальной топливной форсунки. Наличие двух каналов подачи топлива обеспечивает горение топливовоздушной смеси в первичной зоне камеры по диффузионному, кинетическому, либо совместному диффузионно-кинетическому (диффузионный поддерживает стабильность кинетического) механизмам. Как видно (см. рис. 3), топливо из первого канала подается через отверстия в торцевой части форсунки непосредственно в зону рециркуляции продуктов горения. Топливо из второго канала форсунки поступает через ряд радиально расположенных отверстий в теле форсунки в межлопаточный канал завихрителя. Такой способ раздачи топлива обеспечивает приготовление бедной, предварительно перемешанной топливовоздушной смеси перед подачей в зону горения.

В процессе испытаний исследовалось три основных варианта подачи топлива в межлопаточный канал завихрителя: подача топлива через 30 отверстий диаметром 0,95 мм, причем отверстия расположены двумя рядами по кольцевому каналу форсунки (рис. 4, *а*); подача топливного газа через 8 трубок, имеющих 15 отверстий диаметром 1,5 мм, причем трубки расположены радиально перед входом в завихритель (рис. 4, *б*); подача топлива через 15 отверстий диаметром 1,5 мм, причем отверстия расположены одним рядом по кольцу в форсунке (рис. 4, *в*).

При проведении испытаний обнаружено, что последняя схема подачи топлива в камеру сгорания обеспечивает минимальный подогрев газов $\Delta T_T = 100$ градусов, что, в свою очередь, является важным фактором при запусках двигателя в сложных климатических условиях при низких температурах воздуха на входе в ГТУ ($-10 \dots -60$ °С). Схема подачи топлива в завихритель через два ряда отверстий в форсунке (см. рис. 4, *а*) обеспечивает минимальные выбросы оксида углерода CO и максимальную эмиссию оксидов азота NO_x (рис. 5). Это объясняется тем, что энергия струй топлива незначительна, и они не распространяются на весь канал по высоте завихрителя. При этом в зоне рециркуляции образуется локальная зона в приосевой ее части с температурой продуктов выше 1850 К, что и приводит к повышенному содержанию оксидов азота и минимальному оксидов углерода.

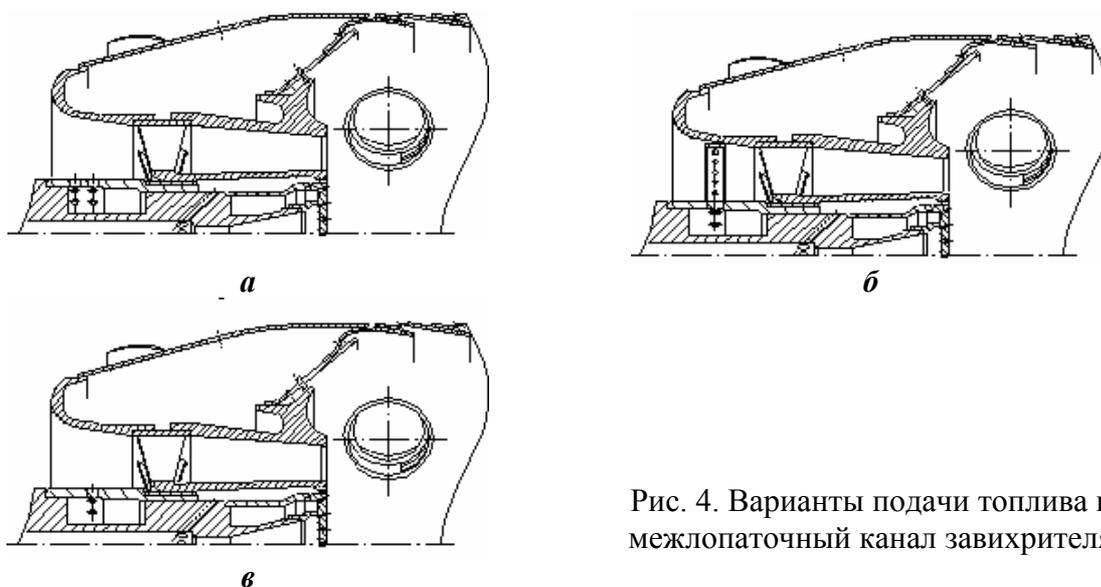


Рис. 4. Варианты подачи топлива в межлопаточный канал завихрителя

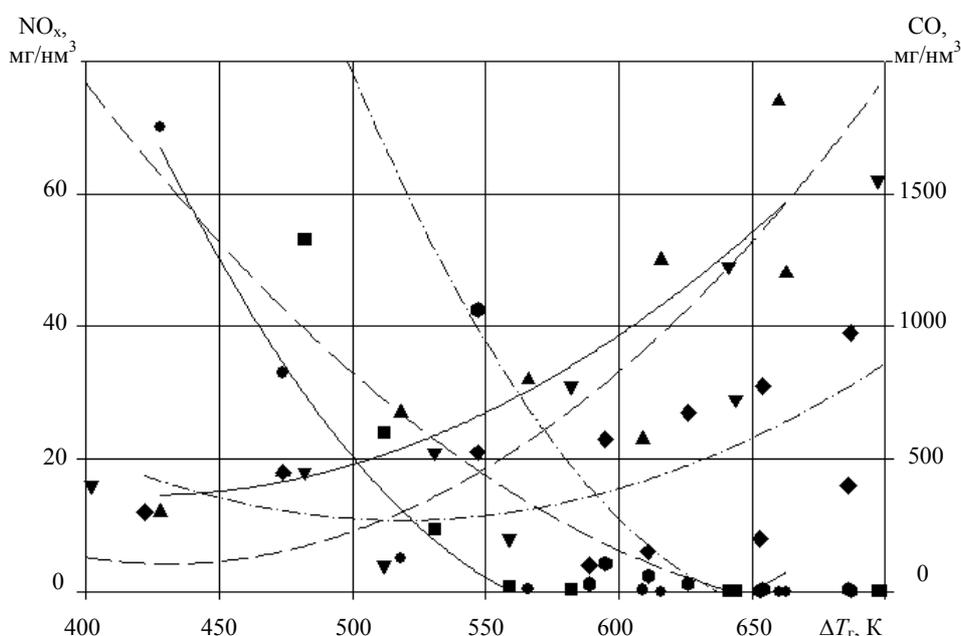


Рис. 5. Экологические характеристики камеры сгорания:

- ▲, — — — — NO_x (вариант *a*); ▼, — — — — NO_x (вариант *б*); ◆, — · — — — NO_x (вариант *в*);
- , — — — — CO (вариант *a*); ■, — — — — CO (вариант *б*); ●, — · — — — CO (вариант *в*)

Подача топлива через радиальные трубки (см. рис. 4, *б*) обеспечивает значительно более равномерное распределение топлива по сечению канала, о чем свидетельствуют результаты, представленные на рис. 5. Однако на режимах, приближающихся к номинальному, поведение двух этих систем становится практически одинаковым.

Наиболее рациональным является режим горения топливовоздушной смеси при подаче топлива в межлопаточный канал через 15 отверстий диаметром 1,5 мм. В этом варианте (см. рис. 4, *в*) зависимость концентрации CO в продуктах сгорания от величины подогрева ΔT_r имеет самую крутую характеристику. Это обусловлено тем,

что струя топлива ближе к периферии канала почти полностью размыта потоком воздуха, и в этом сечении имеет место наиболее обедненная смесь.

При работе камеры сгорания только на кинетическом канале концентрация выбросов оксидов азота снижается примерно в 2 раза, однако устойчивая работа камеры возможна в этом случае только в диапазоне величины подогрева газов $\Delta T_r = 570 \dots 650$ градусов, что обеспечивает режим работы двигателя $(0,7 \dots 1,0) \bar{N}_e$.

Отметим, что при разработке новых видов и конфигураций фронтных устройств необходимо учитывать влияние рабочего процесса на состояние температурного поля газов на выходе из камеры сгорания перед сопловым аппаратом турбины.

В будущем планируется провести более детальное исследование вибрационных характеристик гибридной камеры сгорания, так как работа на обедненных топливовоздушных смесях вызывает повышенную генерацию колебаний звуковой частоты.

Выводы. 1. Определены соотношения расходов топлива через первый и второй каналы горелочного устройства камеры сгорания ГТД мощностью 25 МВт, позволяющие обеспечить стабильное горение топливовоздушной смеси во всем диапазоне эксплуатационных режимов. 2. Подача топливного газа струями в межлопаточный канал осевого завихрителя камеры сгорания ГТД мощностью 15 МВт определяет стабильное горение топливовоздушной смеси во всем диапазоне эксплуатационных режимов. 3. Предложенные конструкции фронтных устройств гибридных камер сгорания могут быть рекомендованы для модернизации двигателей производства НПКГ "Зоря"- "Машпроект" с целью обеспечения низких выбросов экологически вредных веществ.

Литература

1. Воронин В.Г. Улучшение энергетических и экологических параметров одновальных ГТД // Двигателестроение, 1990. – № 6. – С.43–47.
2. Лефевр А. Процессы в камерах сгорания ГТД. – М.: Мир, 1986. – 566 с.
3. Ольховский Г.Г. Совершенствование ГТУ для электростанций // Теплоэнергетика, 1991. – № 6. – С.66.
4. Романовський Г.Ф., Сербін С.І. Екологічно чисті камери згорання газотурбінних установок: Навчальний посібник. – Миколаїв: УДМТУ, 2002. – 84 с.
5. Сербин С.И., Ванцовский В.Г., Захаров Ю.В. Исследования экологических характеристик газотурбинного двигателя GT3000 // Збірник наукових праць УДМТУ. – Миколаїв: УДМТУ, 2002. – № 3 (381). – С.70–77.
6. Совершенствование экологических характеристик ГТД НПП "Машпроект" / В.И.Романов, О.Г.Жирицкий, А.В.Коваленко и др. // Известия Академии инженерных наук Украины. – Николаев: НПП "Машпроект", 1999. – № 1. – С.98–102.
7. Христич В.А., Тумановский А.Г. Газотурбинные двигатели и защита окружающей среды. – Киев: Техника, 1983. – 144 с.

© Романовский Г.Ф., Сербин С.И., Ванцовский В.Г., Вилкул В.В., 2005