

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гриценко Е.А. Методология создания малоэмиссионных камер сгорания авиационных и конвертируемых двигателей семейства НК. // Тезисы докладов Всероссийской научной конференции по проблемам сжигания углеводородных топлив. -М.: РАН. 1998 .
2. Гриценко Е.А., Постников А.М., Цыбизов Ю.И. Снижение выбросов NO_x при конвертировании авиационных двигателей. // Теплоэнергетика. -1996. -№ 3. -С. 61 - 65 .
3. Вопросы отработки экологических характеристик и надёжности КС ГТД наземного применения. / Епейкин Л.Ф., Крыжановский А.И., Лавров В.Н., Николаев В.Е., Цыбизов Ю.И. // Вестник СГАУ, Сер. Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей. Вып. 1, Самар. гос. уэрокосм. ун-т, Самара, 1998. -С.136 – 141.

УДК. 621.45.043

**ТРЕХКОМПОНЕНТНЫЕ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ
КАК ЭФФЕКТИВНЫЙ МЕТОД ОРГАНИЗАЦИИ
НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ
В ТЕПЛОВЫХ ДВИГАТЕЛЯХ СОВРЕМЕННЫХ ЭНЕРГОМАШИН
(АВИАЦИОННЫХ, НАЗЕМНЫХ, СУДОВЫХ И ДР.),
РАБОТАЮЩИХ НА АТМОСФЕРНОМ ВОЗДУХЕ**

Кузнецов Н.Д., Рудницкий А.М.

ОАО СНТК им. Н.Д. Кузнецова, г. Самара

*Посвящается памяти замечательных инженёров ОКБ имени Н.Д. Кузнецова -
Стенькина Евгения Дмитриевича и
Позднякова Игоря Александровича*

Впервые данная работа представлялась на обсуждение по инициативе генерального конструктора Н.Д. Кузнецова на НТС СГНПП "Труд" 24 марта 1992 г. и была впоследствии им дополнена конкретными рекомендациями, учтенными в дальнейшем.

Основные положения новой технологии были обсуждены на заседании научно-технического совета кафедры: "Теплотехника и тепловые двигатели" СГАУ под руководством С.В. Лукачева.

Одной из важнейших научно-технических проблем, стоящих при создании современных тепловых двигателей, работающих на атмосферном воздухе, как окислителя, является обеспечение высоких характеристик рабочего процесса в КС по КПД, надёжности, ресурсу, эмиссии вредных веществ продуктов сгорания (ПС), [5,13,16,17,19].

Обеспечению решения, например, одной только задачи - минимальной генерации оксидов азота (NO_x), посвящены тысячи научных статей,

сотни монографий, книг и пр. Одновременно с этим, за 35 - 40-летний период развития этого направления (темы), а по теплотехническим наземным системам за рубежом эти вопросы затрагивались уже с начала 1950-х годов, [6,7,8,9,12,21] ведущими фирмами, компаниями и многочисленными НИИ (США, Англии, Германии, Франции, Японии, Швеции, России) затрачены сотни миллионов долларов на выполнение колоссального объема работ по данному вопросу.

Все, в основном, достаточно принятые схемы и способы по подавлению генерации NO_x в ПС энергоустановок представлены на рис.1 в виде зависимости количества NO_x (индексов эмиссии $E_{I\text{NO}_x}$) для ряда существующих методов

подавления [14,12,19].

Несмотря на практические, определенные достижения этих разработок, включая и создание так называемых двух зонных КС со ступенчатым сжиганием горючего компонента, все же не удается радикально решить эту задачу – максимального снижения эмиссии NO_x . В немалой степени это обусловлено и непрерывно ужесточающимися нормативными ограничениями по параметру эмиссии $E_{I\text{NO}_x}$, особенно регламентируемого для наземных энергокомплексов, работающих в густонаселенных жилых районах США, Японии, Швеции, Финляндии, Германии, Дании, Голландии и др. высокоразвитых и густонаселенных странах, ко-

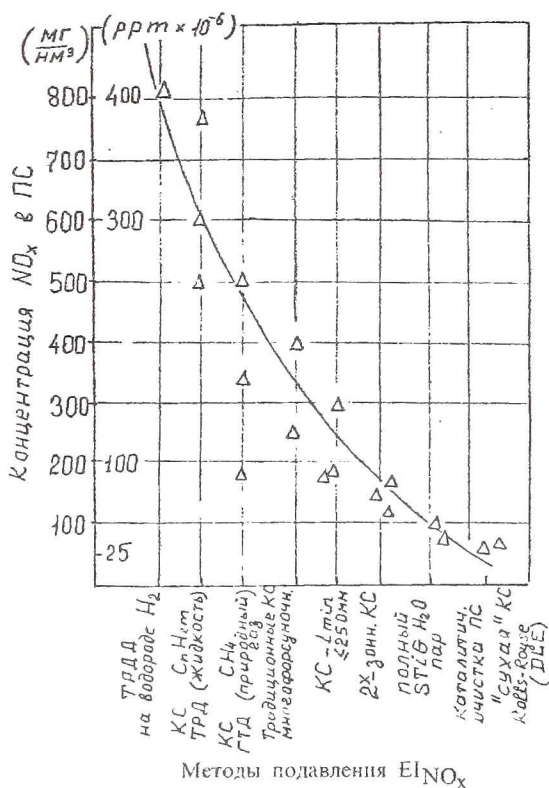


Рис. 1. Уровни эмиссии NO_x (различными энергомашинами) в условиях применения существующих методов по их подавлению

Дании, Голландии и др. высокоразвитых и густонаселенных странах, ко-

гда уровень NO_x в ПС не должен превышать $\sim 100 \dots 50 \text{ мг/нм}^3$. Последнее трудно обеспечить для ГТД, ГТУ, ПГУ с высоким термодинамическим циклом: $P_k \geq 20 \dots 30 \text{ кг/см}^2$, $T_k \gg 700 \dots 900 \text{ К}$, $\eta_{\text{КС}} \sim 99,9 \dots 99,95 \%$ и т.д.

Как перспективным направлением в данной технической проблеме, к рассмотрению и обсуждению новых принципов организации процессов сжигания углеводородных горючих в КС энергомашин, использующих атмосферный воздух, предлагаются трехкомпонентные КС, работающие на двух видах окислителя или двух видах горючего дополнительно к основному рабочему телу – сжатому атмосферному воздуху (рис.2). В первичную зону такой КС (безразлично – с параллельным или последова-

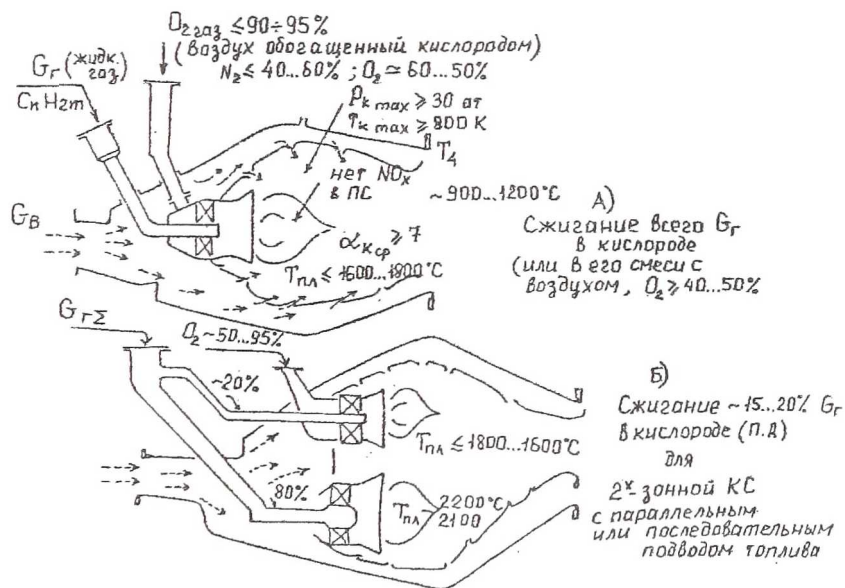


Рис. 2. Схемы 3-х-компонентных КС с применением новой технологии по регулированию температуры огневого факела продуктов сгорания:

- а) за счет использования кислорода (в газообразной фазе);
- б) за счет применения жидкого водорода

тельным расположением фронтных устройств) подводится дополнительный окислитель – газообразный, сжатый кислород или его смесь с воздухом для сжигания всего горючего (жидкого, газообразного или части его $\sim 15 \dots 20\%$ G_{r2}).

В трехкомпонентной КС в смеси с воздухом концентрация кислорода $O_2 \approx 60...65\%$, не более, что достаточно для поддержания высокоэффективного процесса сгорания воздушно-углеводородной смеси (см. рис.3, на котором использованы зависимости из работ [2,3]). Горение уг-

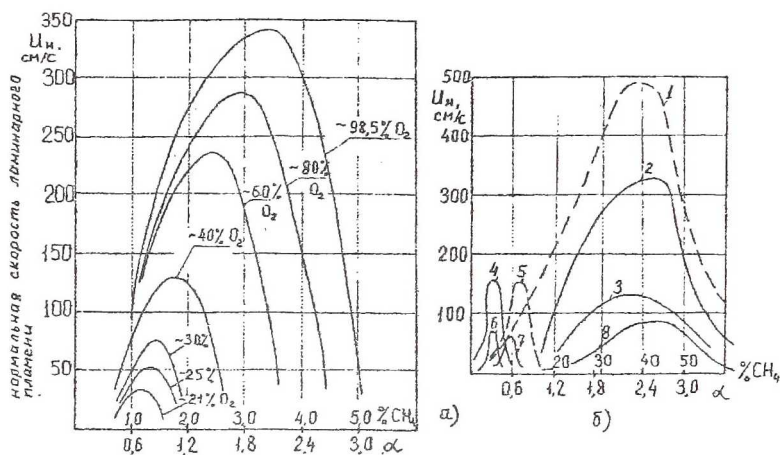


Рис. 3. Зависимости нормальной скорости распространения пламени (U_n) для различных веществ от % -го содержания горючего в окислительной среде

леводородов с кислородом, как известно, при его концентрации уже $\gg 40...60\%$ в смеси с азотом имеет более значительные диапазоны по предельным величинам коэффициента избытка окислителя, но в тоже время при более пониженных величинах температуры огневого факела: $T_{пл} - t_{min}$ (см. рис.3,4) – за счет интенсивного увеличения нормальной скорости распространения пламени [2,3,10], что позволяет реально и надежно создавать практические условия для уменьшения температуры пламени ниже $1400...1500\text{ }^\circ\text{C}$ [14,11], при которой еще не начинается интенсивная эндотермическая реакция между N_2 и O_2 в горячем воздушном потоке. Увеличение концентрации O_2 в массе рабочего тела будет способствовать также снижению количества NO_x .

Такой способ сжигания горючих в современных высокофорсированных энергомашинах с мощностью более $20...100\text{ МВт}$ позволит эффективно уменьшить концентрацию NO_x в ПС, что практически недостижимо применяемыми сегодня методами и способами, сохраняя, одновременно, на высоком уровне другие параметры и характеристики КС.

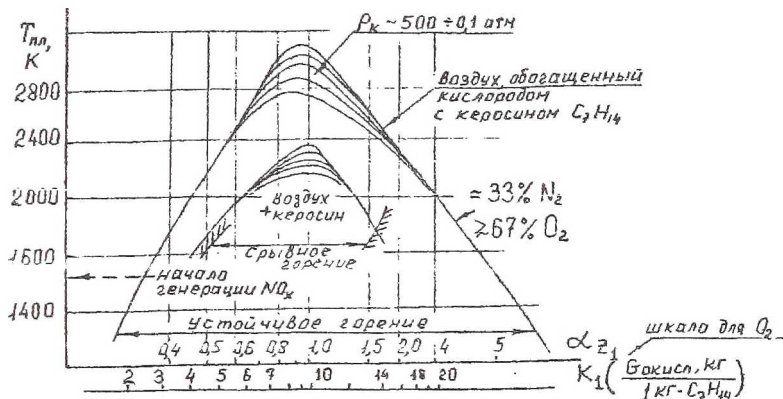


Рис. 4. Температуры продуктов сгорания для разных топлив в зависимости от состава смеси

В предлагаемой схеме трехкомпонентной КС с реально регулируемым низкотемпературным факелом ПС создаются упрощенные условия для снижения концентрации NO_x до 20...10 ppm, наряду с сохранением характеристик срыва пламени, допустимым уровнем по концентрации окиси углерода и поддержанию заданной мощности энергоустановок при высоких значениях P_k и T_k . Этот способ, конечно, не предотвращает незначительного образования NO_x ($\leq 0,001$) в ПС за счет присутствия химически связанных молекул N_2 в молекуле углеводородного горючего, что характерно для определенных марок используемых топлив [10,11].

Благодаря работам Я.Б. Зельдовича с сотрудниками [4], известно, что NO_x не образуются в самом воздушно-углеводородном огневом факеле ПС, а проявляются лишь как функция протекания эндотермической реакции окисления азота воздуха при температурах $\gg 1500...1600$ °С. Образование NO_x происходит согласно действующей реакции (общего вида):



где $Q = f(G_r - H_u)$ и $t \gg 1500$ °С, в которой затрачивается не менее 660 ккал тепла для образования 1 молекулы NO_x [4,11].

Применение кислорода потребует размещения специального оборудования (воздуха-разделительной установки) по выработке предварительно жидкой его фазы. Но стоимость жидкого кислорода O_2 ж на "по-

рядок" дешевле стоимости 1 тонны перегретого H_2O – пара, на которую расходуется до 500 кВт/час, а 1 тонна O_2 требует не более 50 кВт/час [23].

Подачу кислородной смеси по тракту двигателя можно осуществить по различным схемам (рис.5), учитывая, что его суммарный расход по отношению ко всему закомпрессорному воздуху не будет превышать 10...15 % (рис.6). Эти данные делают предпосылку и на возможность распространения предлагаемого метода и для ряда модификаций авиадвигателей воздушных судов специального назначения.

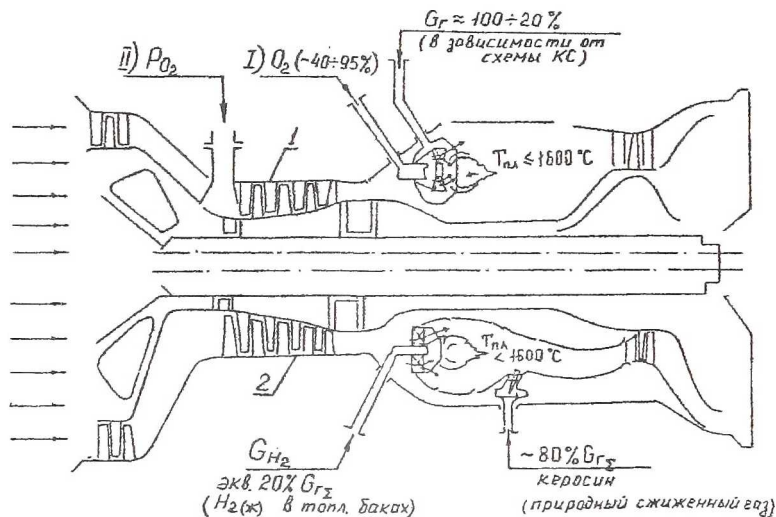


Рис. 5. Возможные схемы двигателей, работающих на атмосферном воздухе с 3-компонентными камерами сгорания

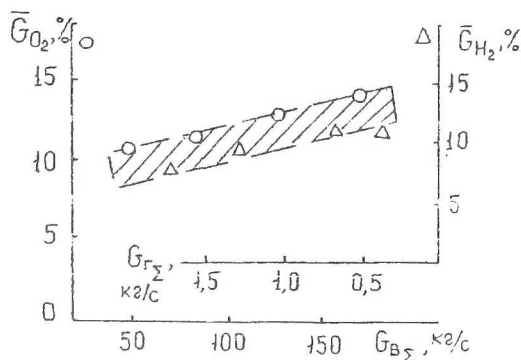


Рис. 6. Ориентировочные относительные расходы кислорода и водорода в 3-компонентных КС современных ГТД

Данный способ позволяет решать, более успешно, трудно преодолимое противоречие между понижением EI_{NOx} и ростом, при этом, EI_{CO} , что связано в основном с падением $\eta_{КС}$, когда достигается "повышенное обеднение" рабочей смеси ($\alpha \gg 2,1 \dots 2,2$), за счет искусственного снижения

$T_{пл}$ огневого факела, приводящее, естественно, к снижению $\eta_{КС}$ как за счет впрыска воды (пара) или, как уже отмечалось, максимального обеднения горючей смеси в основной зоне КС.

Реальность осуществления и верность выбранного направления подтверждены ранее проведенными экспериментами и разработками авторов [24] - по получению практического самовоспламенения и процесса горения газообразного кислорода с распыленным жидким керосином при $t_{02} \leq 700...800$ °С, а также экспериментально-исследовательскими разработками английских инженеров [15] - по созданию и испытанию малогабаритной двухкомпонентной КС (традиционной схемы), предназначенной для малой энергоустановки боевого ЛА. Устойчивые кислородно-метановые пламена в такой КС поддерживались при низких температурах пламени $T_{пл} \leq 1100...1200$ К.

Проведенный предварительный технико-экономический расчет ожидаемого экономического эффекта показал, что он может достигать $(10...15) \cdot 10^6$ долл. США в год, исходя из сравнительных условий эксплуатации ГТД НК-16СТ на газокompрессорном комплексе ГПА-Ц-16 [23].

Предлагаемый прием можно, и нами рекомендуется, использовать как при проектировании, так и при отработке авиадвигателей, использующих жидкое водородное горючее [18].

Применение жидкого водорода ($H_{2ж}$) в обычной стандартной схеме ТРД, как, например, на ТРДД НК-89, конструкции СГНПП "Труд", даже при наличии одной силовой установки на борту ЛА (типа ТУ-155), вряд ли практически приемлемо по причине возникновения неизбежных значительных габаритов водородных баков, объем которых в целях выполнения летно-технических параметров может достигать $100...200$ м³ и более, что соизмеримо с объемом самого фюзеляжа воздушного судна (вследствие очень низкого уровня $\rho_{H_2} \leq 0,089$ кг/м³).

Если же сжигать водорода в пределах не более $15...20\%$ от всего количества потребного углеводородного горючего для конкретной КС авиадвигателя (ТРД), т.е. $G_{H_2} \approx 15...20\%$ от $G_{Г\Sigma}$, сжигаемого в дежурной зоне уже двухзонной КС, тогда расход $H_{2ж}$ (в таких условиях) не будет превышать $0,12...0,14$ кг/с при принятом, допустим, суммарном расходе всего горючего (углеводород + $H_{2ж}$) $1...1,1$ кг/сек (см. схему ТРДД на рис.6), а 80% углеводородного горючего сжигается в основной зоне такой трехкомпонентной двухзонной КС.

Так как значения величин нормальной скорости распространения пламени U_n для водородно-воздушных пламен существенно выше, чем для углеводородных горючих (см. рис.3 [2,10]), то, как и в ранее рассмотренном предложении, в первичной зоне водородо-углеводородной КС будет обеспечен достаточно пониженный уровень огневого факела – дежурного (водород + воздух), за счет поддержания соответствующего значения коэффициента избытка воздуха. Будет обеспечено получение значения $T_{пл}$, достаточное для надежного, беспрерывного горения, и такое её значение, при котором концентрация NO_x весьма минимальна и поддается контролю по её уменьшению.

При такой схеме новой конструкции КС расход жидкого водорода сокращается почти в 10 раз в сравнении с традиционным ТРДД [18], и объем водородных баков уже не будет превышать 10...30 м³, что создает условия для реальной эксплуатации ЛА, использующих такое эффективное горючее.

Данный способ, наряду с решением конкретной задачи по оптимизации параметров ЛА, позволяет, как и в первом случае, регулировать в нужном диапазоне концентрацию NO_x , так как при использовании лишь одного H_2 уровень содержания NO_x в продуктах сгорания весьма повышен, вследствие значительного превышения $H_U H_2 \approx 28000$ ккал/кг над H_U для керосинов, что ведет к увеличению $T_{пл H_2}$ и, как следствие, к интенсификации генерации NO_x (см. рис.1).

В обсуждении данного материала принимали участие ведущие специалисты ОКБ Н.Д. Кузнецова: В.Н. Орлов, А.М. Постников, Ю.И. Цыбизов, Н.А. Маркушин, В.Н. Лавров, Н.В. Церерин, Л.Ф. Епейкин, А.С. Фрейдин, В.Е. Пластинин, А.Н. Маркушин, С.П. Чернышев и др., давшие свои замечания и предложения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.

1. Кузнецов Н.Д., Рудницкий А.М. Предложения о создании высокоэффективного энергетического комплекса на основе газотурбинных авиадвигателей наземного применения. // Доклад на НТС СГНПП "Труд" -Куйбышев: СГНПП "Труд", 1992.
2. Стаскевич Н.Л. Справочное руководство по газоснабжению. -Л.: 1960.
3. Хзмялян М., Каган А. Теория горения и топочные устройства. -М.: 1976.
4. Зельдович Я.Б., Садовников П.Я., Франк-Коменицкий Д.А. Окисление азота при горении. -М.: Из-во АН СССР, 1947.
5. Многофазные камеры сгорания – одно из перспективных направлений в развитии двигателестроения. / Кузнецов Н.Д. и др.// Проблемы машиностроения и надежности машин. -1995. -№2.

6. R u d c y R.A. Status review of NASA programs for reducing emissions Third International Symposium on Air Breathing Engines, München, 1976.
7. Р и ц к Н., М о н ж и а Г. Применение концепции двухзонной КС с низким уровнем эмиссии NO_x // Новости зарубежной науки и техники. Сер. Авиационные двигатели. М.: ЦИАМ. -1992. -№3.
8. B u r g h a m T., G i n l i a u i M., M o e l l e r D. Development, Installation and operating Results of a Steam Injection System (STIG™) in a General Electric LM5000 GAS Generation, ASME. -1988.
9. M u l h o l l a n d V., H a l l R. Fuel Oil Reburning Application for NO_x control to Firetube Package Boilers, ASME, -1988. -№5.
10. Основы горения углеводородных топлив. / Пер. с англ., под ред. Л.Н. Х и т р и н а, -М.: 1960.
11. Л е ф е в р А.Х. Процесс в камере сгорания ГТД. -М.: Мир, 1986. -566с.
12. У р б а н К., Д и ц м а н А., Ф а н т Н. Методы борьбы с выбросами NO_x в атмосферу для стационарных газовых установок// Труды Американского общества инженеров-механиков. Сер.А, -1990. -№1.
13. О л ь х о в с к и й Г. Снижение концентрации окиси азота в выбросах ГТУ// Теплоэнергетика, -1993. -№3.
14. К о л п Н., М е л л е р Д. Ввод в эксплуатацию первой в мире газотурбинной установки полного цикла STIG на базе газогенератора LM-5000 (фирма Simpson Papper Company)// Труды Американского общества инженеров-механиков. Сер.А, -1989.-№11.
15. К а р р Е., Г о д д Г. Камера сгорания на метанол-кислородном топливе для бортовой аварийной вспомогательной энергоустановки. // Труды Американского общества инженеров-механиков. Сер.А, -1989.-№8.
16. К а н и л о П.М., Х р и с т и ч В.А., П о д г а р н ы й А.Г. Энергетические и экологические характеристики ГТД при использовании углеводородных топлив и водорода. - Киев: Наукова думка, 1987. -224с.
17. М а р к у ш и н Н.А., М а р к у ш и н А.Н. Исследование малотоксичной демонстрационной кольцевой КС ГТД. // Известия вузов. Сер. Авиационная техника, -1991. -№2.
18. М а р к у ш и н Н.А., М а р к у ш и н А.Н. Экспериментальные исследования вихревых горелок КС ГТД. // Известия вузов. Сер. Авиационная техника, -1994. -№4.
19. О р л о в В., С о с у н о в В. Экспериментальный ТРДД, использующий в качестве топлива жидкий водород и сжиженный природный газ. // AIAA-90-2421, 1990.
20. О р л о в В., Ф и ш б е й н Б. Конвертированные газотурбинные двигатели авиационного типа НК-36СТ и НК-37 для народного хозяйства. – В сб.: Тезисы докладов на XVII научно-теоретической конференции. Секция «Современные схемы ГТУ и ЛГУ, их эксплуатация».-М.: ВТИ, 1995.
21. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания. Справочник, Т2 и Т3/ Под ред. акад. В.П. Г л у ш к о.-М.: ВИНТИ АН СССР, 1972. ;
22. Сухая малозмиссионная камера сгорания Роллс-Ройс (DLE) с последовательным распределением топлива. (Материалы службы маркетинга отдела судовых и промышленных двигателей компании Джeneral Электрик (США). // Мир газовых турбин -1996. -№1, №2.
23. Рудницкий А.М. Ориентировочный технико-экономический расчет эффективности новой технологии организации процесса горения в КС ГТД. // Тех справка № К-163. -Самара: СГНПП «Труд», 1992.
24. А с № 61711 СССР, Спец. Тема. / Рудницкий А.М., Фрейдин А.С и др., 1972.