

О КАМЕРАХ СГОРАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ



Олег Юрьевич Бондарев, специалист II уровня по визуальному и измерительному контролю, президент Промышленной ассоциации "МЕГА" в области технической диагностики



Юрий Александрович Тарасенко, специалист инженерно-авиационной службы ВВС

(Окончание. Начало в № 5 - 2013)

Кое-что о зажигании

Во время работы камеры сгорания ПТД постоянного принудительного зажигания топливо-воздушной смеси не требуется. Жара вокруг итак достаточно. Однако пусковое воспламенение, как и любому двигателю, необходимо.

Источником пламени в этом случае служит высокотемпературный электрический разряд запальной свечи, похожей на свечу обычного бензинового двигателя внутреннего сгорания. Но только похожего, потому что в ДВС применяются обычные электрические высоковольтные искровые свечи. У них мощность разряда зависит от давления в камере сгорания, и чем оно ниже, тем ниже мощность. В сервисной аппаратуре при проверке таких свечей его даже специально накачивают.

Это невыгодно для авиадвигателя, особенно, к примеру, для высотного запуска. Поэтому на всех современных авиационных ПТД

сейчас применяются так называемые низковольтные полупроводниковые свечи поверхностного разряда, на которые внешнее давление влияния не оказывает.

Собственно поджиг топливно-воздушной смеси может происходить непосредственно от свечи зажигания или же с применением специальных топливных воспламенителей. Последнее на современных двигателях применяется чаще.

Воспламенитель представляет собой, по

сути дела, миниатюрную камеру сгорания, к которой смонтирована чаще всего простая одноступенчатая центробежная форсунка и свеча зажигания для непосредственного розжига. Для осуществления надежного высотного запуска обычно имеется подпитка кислородом.

Пусковое топливо подается в камеру воспламенителя по специальному закону регулирования топливоподдачи, отличному от основной камеры сгорания для обеспечения надежного и устойчивого запуска.

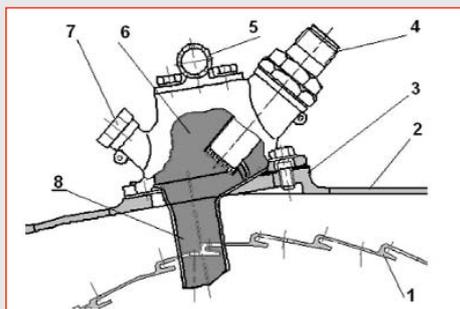


Рис. 34. Установка воспламенителя на камеру сгорания

Сам воспламенитель устанавливается снаружи камеры сгорания, обычно в ее передней части, где он не подвержен воздействию горячих газов (за исключением пламяподающего патрубка). Воздух из-за компрессора поступает в него через специальные отверстия.

Патрубок воспла-

менителя введен в жаровую трубу, непосредственно в зону горения, для подачи туда факела пламени. Таких воспламенителей для надежного розжига бывает обычно больше одного (два или три), особенно это актуально для трубчатых и трубчато-кольцевых камер сгорания.

О материалах

Для обеспечения достаточного ресурса жаровых труб в двигателе они никогда не находятся под силовой нагрузкой, то есть не включены в силовую схему двигателя. При этом материалы, из которых они изготавливаются, имеют высокие характеристики жаростойкости и жаропрочности. Кроме того, такие материалы удобны в обработке, стойки к газовой коррозии и вибрациям.

Обычно это специализированные хромоникелевые сплавы. Для российской металлургии это типы Х20Н80Т, ХН60В, ХН70Ю, ХН38ВТ, Х24Н25Т. Если камеры сгорания работают при температурах до 900 °С, то могут применяться сплавы типа Х20Н80Т, ХН38ВТ, ХН75МВТЮ. А для температур 950...1100 °С - сплав ХН60В.

Сами жаровые трубы собираются при помощи сварки отдельных частей - секций. Во избежание температурных напряжений между секциями связь между ними выполняется с "малой жесткостью", то есть делается упругой. С этой целью выполняются многочисленные разрезы вдоль образующей линии секции с отверстиями большого диаметра на конце для уменьшения концентрации напряжений. Это так называемые "температурные швы".

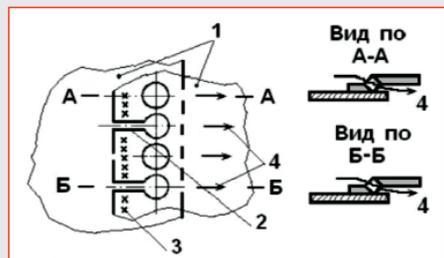


Рис. 35. Соединение секций камеры сгорания (упругое)

Кроме того, элементы жаровых труб изнутри покрываются специальными жаростойкими эмалями, или иначе - стеклоэмальевыми покрытиями. У этих покрытий двойная функция. Из-за низкой теплопроводности они вносят свой вклад в предохранение стенок жаровой трубы от перегрева. Такое покрытие толщиной в 1 мм с низким коэффициентом теплопроводности может обеспечить снижение температуры стенки почти на 100 °С.

Помимо этого, эмаль служит хорошей защитой от газовой коррозии, то есть окисления материала элементов ЖТ имеющимся в составе газа свободным кислородом. В процессе эксплуатации эмаль из-за эрозионных явлений постепенно изнашивается и утончается, но может быть восстановлена при плановом ремонте двигателя. Эма-



Рис. 36. Защитная стеклоэмаль на кольцевой КС

ли повышают сопротивляемость коррозии в 6...8 раз. Работают при температурах 600...1200 °С (в зависимости от типа).

Одна из самых распространенных эмалей на двигателях российского производства (больше для "старых" двигателей) - ЭВ-55, используемая, в частности, со сплавом 1Х18Н9Т. Она, кстати, имеет характерный зеленый цвет из-за присутствия в ее составе хрома в виде диоксида.

Другая распространенная эмаль, ЭВК-103, может длительно работать при температурах до 1000 °С и применяется для сплавов типа ХН60ВТ (ВЖ98).

Для перспективных сплавов, таких как ВЖ145 (рабочая температура до 1100 °С, ВЖ155/171 (рабочая температура до 1200 °С) разрабатываются специальные добавки для улучшения свойств серийных стеклоэмалей типа ЭВК.

Кроме того, используются композитные материалы и керамика, значительно повышающие эксплуатационные возможности перспективной техники (композитный керамический состав ВМК-3/ВМК-3). Становится возможной разработка деталей, которые работоспособны при температурах до 1500 °С. Практика применения керамики для производства некоторых элементов уже опробована на двигателях военного предназначения, теперь пришел черед двигателей коммерческих.

О контроле состояния элементов

Постоянно растущие температура и давление процесса горения в камерах сгорания ГТД требуют современных методов контроля за состоянием элементов конструкции. В этом плане есть, так сказать, и предмет, и средства. Практически все существующие и перспективные камеры сгорания имеют достаточно хорошую контролепригодность, особенно что касается визуальных осмотров.



Рис. 37. Эндоскопы XLG0 (а) и XLG3 (б)

Применение специальных бороскопических устройств делает визуальный осмотр и контроль внутренних полостей достаточно несложным делом. Наиболее широко (и удобно) применяемые в этом плане аппараты - это видеоэндоскопы типа XLG0 (Everest XLG0) или более "серьезный" технический эндоскоп XLG3 VideoProbe от GE InspectionTechnologies.

Для осмотра внешней поверхности жаровых труб обычно могут быть использованы два подхода. На всех современных двигателях во внешнем корпусе камеры сгорания имеются специально предназначенные для бороскопических инспекций отверстия (порты), закрытые легкосъемными пробками.

Через такие порты щуп бороскопа может достать практически любую точку под внешним корпусом камеры сгорания ГТД. Если у бороскопа длинный гибкий щуп с хорошей артикуляцией (тот же XLG0, например), то эта задача упрощается многократно, и состояние практически любого подозрительного места может быть хорошо проверено и проанализировано, в том числе с применением 3D

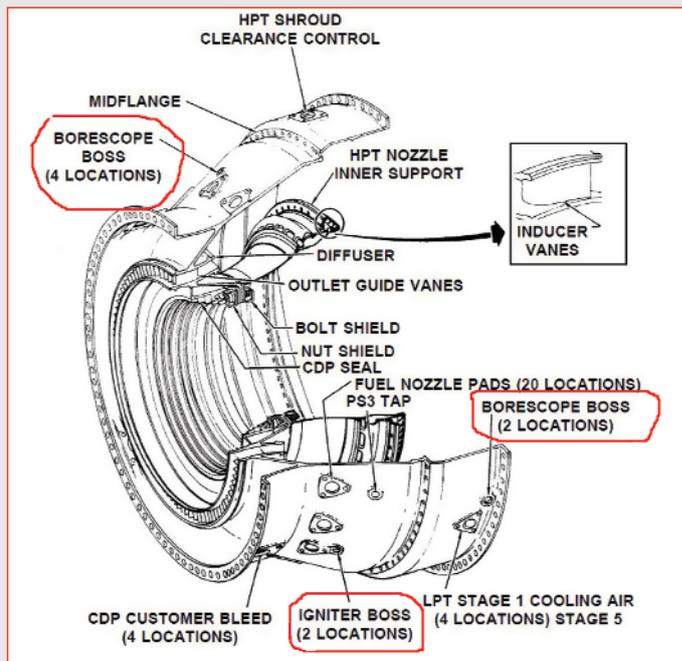


Рис. 38. Пример расположения точек доступа для бороскопической инспекции камеры сгорания. Двигатель CFM56-3

анализа и выполнении качественных снимков и видеозаписей.

Точно также (второй способ) можно произвести осмотр и через отверстие на месте снятого пускового воспламенителя. Демонтаж-монтаж воспламенителя обычно не является сложной операцией. В этом случае можно произвести осмотр как наружных, так и внутренних полостей камеры сгорания ГТД.

Кроме того, фронтные устройства и диффузор КС можно осмотреть через бороскопические порты для последней ступени компрессора (для ТРДД и ТВРД это компрессор низкого давления). Таким же образом осматривается газосборник жаровой трубы (как, впрочем, и вся жаровая труба изнутри) через бороскопические порты на сопловом аппарате первой ступени турбины.



Рис. 39. Снимок внутренних поверхностей камеры сгорания, сделанный при помощи XLG0



Рис. 40. Внутренние полости КС на экране видеоэндоскопа

Такого рода порты (как на компрессоре, так и на турбине) есть практически на всех современных ГТД. Эти работы не требуют демонтажа двигателя и других каких-либо сложных демонтажно-монтажных работ.

Экологические нюансы

В современных условиях мирового роста объема авиационных перевозок, как пассажирских, так и грузовых все большее значение приобретает, можно сказать, "культура применения" авиационных двигателей. То есть человеку становятся небезразличны не только высокие тяговые характеристики авиационного газотурбинного двигателя, но также его экономичность и экологичность. Экологичность напрямую связана с вредными выбросами двигателя в атмосферу. К их количеству при создании современных двигателей (а значит, и камер сгорания ГТД) предъявляются сейчас довольно жесткие требования. Это заставляет создателей и конструкторов камер сгорания использовать новые, нетрадиционные приемы.

В чем суть этих приемов и что, собственно, представляют из себя вредные выбросы?

Фундаментальная формула горения (окисления) топлива (керосина) в камере сгорания ПТД имеет примерно такой вид: $C_{12}H_{23} + 17,75 O_2 = 12 CO_2 + 11,5 H_2O$.

То есть два основных продукта, получающихся в результате горения топлива, - это вода и углекислый газ.

В газах, покидающих камеру сгорания ПТД, в наибольших количествах содержатся: кислород O_2 , азот N_2 и получающиеся в результате горения углекислота и вода. Кроме того, присутствуют продукты неполного окисления типа CO , несгоревшие углеводороды HC (типа CH_4 , C_2H_4), а также продукты распада, получившиеся в результате высокотемпературной диссоциации.

В меньшем количестве представлены вещества типа SO (обычно как результат окисления серы, содержащейся в топливе), оксиды азота NO_x , различные амины, цианиды, альдегиды и полициклические ароматические углеводороды (в небольших количествах). Кроме того, присутствует углерод в виде сажи и дыма как результат термического разложения топлива в зонах его переизбытка.

Из всего этого списка только первые четыре продукта не обладают токсичными свойствами и не оказывают неблагоприятного влияния на атмосферу (хотя насчет CO_2 это относительно). Остальные так или иначе вредны для атмосферы, живых организмов и человека. Некоторые особо опасны.

К таким относятся окислы азота NO_x (в особенности NO и NO_2), монооксид углерода CO (угарный газ), углеводороды CH различного состава (канцерогены, широко известен бензопирен $C_{20}H_{12}$) и углерод в виде сажи или дыма (адсорбирует на себе токсины и при попадании в организм не выводится из него).

Выброс этих веществ авиационными двигателями в атмосферу (эмиссия) сейчас регламентируется достаточно жесткими специальными правилами ICAO (последний обновленный свод норм CAEP 8 от 2010 года).

Основная часть окислов азота (до 90 %) образуется в камере сгорания ПТД по так называемому термическому механизму, когда атмосферный азот окисляется кислородом при высокой температуре. То есть, для того чтобы NO_x было меньше, нужна, во-первых, меньшая температура горения и, во-вторых, меньшая концентрация кислорода, хотя влияние второго фактора менее существенно.

Максимальная температура горения достигается при стехиометрическом составе ТВС (то есть когда воздуха есть ровно столько, сколько нужно для полного сгорания имеющегося количества топлива). Параметр, характеризующий состав топливно-воздушной смеси, - это упоминавшийся уже коэффициент избытка воздуха (α), и он в таком случае равен единице.

Однако при T_{max} будут идеальные условия для еще большего образования окислов азота. Поэтому с точки зрения уменьшения их количества

камера сгорания ПТД должна работать подальше от зоны $\alpha = 1$, то есть ТВС не должна быть стехиометрической. Либо обогащенной, либо обедненной. Плюс к этому хорошо перемешанная топливно-воздушная смесь (ТВС) не должна долго находиться в зоне с высокими температурами, что подразумевает меньшие осевые размеры камеры сгорания.

CO - это результат неполного сгорания топлива, когда кислорода для завершения реакции окисления не хватает. Это бывает в зоне с богатой смесью. Если же смесь бедная или близкая к стехиометрической, то CO образуется в результате диссоциации. Поэтому способ борьбы с его образованием - это хорошее перемешивание ТВС и улучшение полноты сгорания.

CH - углеводороды, присутствующие в газе в результате термического разложения топлива на более простые составляющие и его неполного сгорания из-за некачественного перемешивания. Способ борьбы - все то же хорошее перемешивание ТВС, плюс более длительное нахождение ее в зоне горения.

Сажа (углерод). Ее образование зависит от состава топлива, качества перемешивания смеси и распыливания топлива. При повышении давления в КС сажеобразование увеличивается.

Традиционные камеры сгорания "старых" двигателей, имеющие консервативную конструкцию и работающие на смесях оклостехиометрического состава ($\alpha = 1$), не позволяют ощутимо снизить количество вредных выбросов. На режимах малой тяги с пониженной полнотой сгорания (до 88...93 %) растут выбросы CO и HC , а при повышении нагрузки растет температура и, соответственно, выбросы NO_x .

Поэтому ведущими мировыми производителями ПТД для решения этой задачи и достижения соответствия требованиям CAEP разрабатываются новые низкоэмиссионные КС с применением инновационных технологий.

Работа эта очень непростая из-за сложности и чувствительности процессов, проходящих в КС. Зачастую факторы, влияющие на образование вредных эмиссионных составляющих (NO_x , CO , CH , сажа), могут находиться в определенном противоречии друг с другом и с такими параметрами двигателя, как тяговая эффективность и экономичность.

Например. Работа камеры сгорания в зоне с богатой ТВС уменьшает возможность образования NO_x , но значительно повышает выбросы углерода в виде сажи. Работа в зоне с обедненной смесью уменьшает количество окислов азота и сажи, но при этом появляется тенденция к росту количества CO и CH . К тому же обедненная смесь не обеспечивает стабильность розжига и работы на режимах малой тяги.

Уменьшение осевых размеров камеры сгорания ПТД, как уже было сказано, тоже снижает количество образуемых NO_x , но при этом опять появляется тенденция к росту образования CO и CH . Уменьшаются возможности высотного запуска таких камер.

В общем, для достижения какого-либо приемлемого решения в том, какой путь выбрать, без компромиса не обойтись. В последние два десятилетия довольно четко обрисовались два основных направления в создании перспективных камер сгорания для современных двигателей с высокой степенью повышения давления в компрессоре.

Первое направление развития КС. КС, работающие на расчетном режиме (большая тяга) на обедненной топливно-воздушной смеси. В таких камерах на основном режиме достигается хорошее предварительное перемешивание ТВС и качественное испарение топлива. Однако такая камера не может самостоятельно обеспечить хороший розжиг и горение на режимах малой тяги.

Решение проблемы выливается обычно в создание двух зон горения: пилотной зоны для запуска и режимов малой мощности, которая работает на богатой смеси и оптимизирована под низкое выделение CO и CH , и основной зоны для расчетных режимов большой тяги, работающей на обедненной ТВС.

Такие двухзонные камеры (а также двухрусные) достаточно сложны по конструкции, имеют большую массу и стоимость. Для их изготовления из-за больших тепловых напряжений (по сравнению с традиционными камерами) была разработана новая, так называемая сегментная технология.

Каждая кольцевая секция, из которых состоит жаровая труба, разрезана на отдельные сегменты, которые при помощи специальных крючков и пластин (шпонок) крепятся к общей силовой раме. Получается такая "плавающая" или "дышащая" конструкция, без

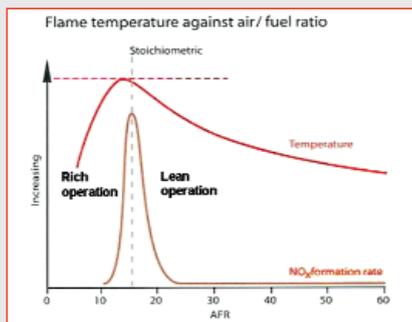


Рис. 41 - Влияние температуры и состава смеси на образование окислов азота



Рис. 42 - Двухзонная камера сгорания

напряжений реагирующая на термические нагрузки. Это позволяет повысить надежность и ресурс жаровой трубы.

Сегменты делают возможным применение более эффективно охлаждения. В охлаждающих каналах организуется параллельно-противоположное течение воздуха (конвекция), плюс последующее заградительное охлаждение поверхности.

Кроме того, сегментная конструкция делает возможным применение керамики при изготовлении элементов камеры сгорания.

Примером эксплуатационного использования камеры такого типа может служить КС CFM56 DAC (Dual Annular Combustor), устанавливаемая на двигателях CFM56-5B/7B. Показатели ее видны на диаграмме. А также камера DAC на двигателях GE90-94B/115B. На всех этих двигателях камера сгорания типа DAC устанавливается как дополнительная опция, то есть по желанию заказчика.

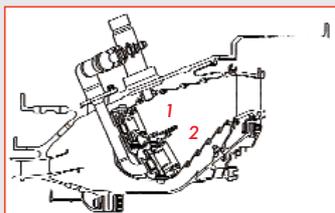


Рис. 43. Камера сгорания типа DAC для двигателей CFM56: 1 - пилотная зона, 2 - основная зона

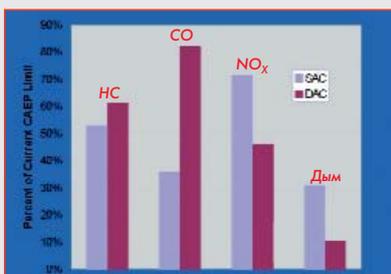


Рис. 44. Отличия в количестве вредных выбросов Dual Annular Combustor и Single Annular Combustor

В качестве перспективных технологий и камер сгорания, создаваемых на их основе и работающих на обедненной смеси, которые в принципе предназначены для замены камер типа DAC, можно назвать технологию ANTLE (Affordable Near Term Low Emissions) фирмы Rolls-Roys (а также еще более далекая перспектива - CLEAN) и технологию TAPS (Twin Annular Premixing Swirler) от фирмы General Electric.

Камеры сгорания такого типа работают на основе принципа так называемого предварительного смешивания. Проще говоря, здесь определенной конструкции аэрофорсушки помещены в блок специальных воздушных завихрителей. Сама предварительная турбулизация (закручивание) воздуха начинается, по сути дела, еще до входа в жаровую трубу.

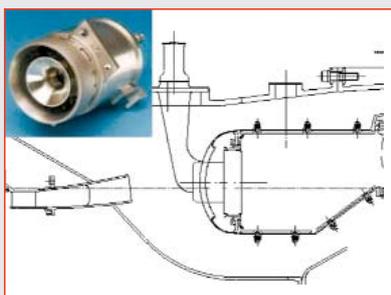


Рис. 45. Перспективная камера сгорания по технологии ANTLE

Такая конструкция значительно улучшает условия и надежность горения. Зоны горения расположены здесь последовательно. Пилотная зона для устойчивого запуска и работы на малой тяге тоже есть.

Такие камеры имеют укороченный осевой размер и практически не имеют отверстий в жаровой трубе для прохода вторичного воздуха. Камеры сгорания TAPS превосходят по показателям количества выбросов (NO_x, CO, CH) камеры DAC. Такие КС планируются к использованию на двигателях CFM-56-7B.

Второе направление развития КС. Это технология RQL. Аббревиатура расшифровывается следующим образом: Rich-Burn, Quick-Mix, Lean-Burn Combustor, то есть горение богатой смеси, быстрое смешение и горение бедной смеси. В этом, собственно, и состоит весь принцип.

Камера RQL - это, по сути дела, двухзонная КС с последовательным расположением зон горения. Первая - зона с богатой ТВС (на рисунке коэффициент избытка воздуха 1,8). Здесь имеет место устойчивое горение при относительно невысокой температуре и малом количестве кислорода. Поэтому количество образующихся окислов азота тоже мало. Но при этом образуется достаточно много горючих веществ типа CO, простейших углеводородов CH, водорода H₂, а также углерода (сажи). Эти вещества нельзя выпускать



Рис. 46. Принцип технологии RQL

в атмосферу, поэтому организуется вторая зона горения.

Через специальные отверстия в стенках жаровой трубы (смеситель) подводится дополнительный воздух так, чтобы смесь стала бедной ($\alpha = 0,6$). Далее происходит горение обедненной смеси, при которой образование NO_x также мало, и сгорают CO, CH, H₂, поступившие из "богатой" зоны. В итоге газ выходит из камеры сгорания, имея вполне приемлемый состав компонентов (в идеале).



Рис. 47. Камера сгорания, работающая по принципу RQL

Главный "фокус" и проблема такой технологии - это обеспечение быстрого и качественного перемешивания газового потока на промежуточном этапе (Quick-Mix), с тем чтобы не допустить формирования смеси стехиометрического состава (практически), что может вызвать резкое повышение температуры потока с нежелательными последствиями, как в плане вредных выбросов, так и в плане надежности работы элементов конструкции.

Крупнейшие мировые производители двигателей имеют свои разработки с применением технологии RQL. Одна из самых известных - разработка фирмы Pratt&Whitney, камера сгорания типа TALON (Technology for Advanced Low Nox). Один из последних вариантов - TALON II для двигателей PW4158/4168 и PW6000. Как близкая к завершению перспектива - следующий вариант TALON X.

Rolls-Roys в этом плане имеет свою разработку - камеру сгорания "Tiled Phase 5", устанавливаемую на двигатели Trent 500/800/900/1000. Фирма GE - камеру сгорания, выполненную по технологии LEC (The Low Emission Combustor).

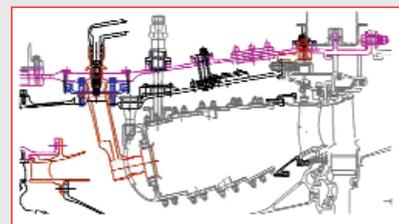


Рис. 48. Перспективная КС фирмы Rolls-Roys

Все вышеперечисленные образцы, как, впрочем, и находящиеся в эксплуатации современные и вполне надежные камеры сгорания ПТД, в той или иной степени не идеальны. Добиться значительного улучшения в этом плане не так-то легко. Сложный и во многом даже тяжелый процесс создания новых КС, преодолевая препоны конструктивного консерватизма, продвигается через множество инженерных и технических компромиссов.

**Официальный поставщик
технических видеоэндоскопов XLG0+ и XLG3 в России,
дистрибьютор компании General Electric
по направлению визуально-измерительного контроля**

ООО "Мега Инжиниринг":

Москва, 129343, Проезд Серебрякова, д. 2/1
 Многоканальный телефон: 8 (495) 600-36-42
 Факс: 8 (495) 600-36-43
 Бесплатный телефон по России: 8 (800) 555-31-42
 Срочные вопросы: 8 (985) 970-97-19
 Интернет: www.mega-ndt.ru, www.xlg3.ru
 E-mail: info@mega-ndt.ru