

УДК 621.431.75

## НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ВЫСОТНОГО ЗАПУСКА ДВИГАТЕЛЯ ТИПА РД-33

©2012 С. В. Коцюбинский<sup>1</sup>, Ю. А. Равикович<sup>2</sup><sup>1</sup>ОАО «КЛИМОВ»<sup>2</sup>Московский авиационный институт (МАИ)  
(национальный исследовательский университет)

В статье описаны особенности высотного запуска двигателя типа РД-33 с использованием кислорода. На основании анализа данных нескольких полётов обнаружено отрицательное влияние кислородной подпитки свечей зажигания на процесс горения в зонах обратных токов у пусковых форсунок в основной камере сгорания. Предложено изменить циклограмму запуска двигателя со смещением времени подачи кислорода. Предложено вместо кислорода в свечи зажигания подавать сжатый воздух из пневматической системы на борту самолета. Предложено модернизировать свечу зажигания и систему зажигания для улучшения длины пламени и эффективности пробы в зону обратных токов пусковых форсунок.

*Запуск двигателя в полёте, исключение кислородной подпитки, модернизация свечи зажигания.*

### Введение

Эффективность запуска двигателя в различных условиях эксплуатации требует анализа всех составляющих частей этого процесса. Остановимся на функциях и особой роли кислорода в создании условий для зажигания топливо-воздушной смеси (ТВС) на конкретных примерах запуска двигателя на большой высоте. Обратим внимание на некоторые особенности конструкции камеры сгорания, системы зажигания, циклограммы запуска двигателя в полёте. Определим причины отсутствия высотного запуска.

### Образование зоны обратных токов во фронтном устройстве

Для устойчивого горения в форсуночной головке жаровой трубы основной камеры сгорания с помощью воздушного завихрителя и центробежной топливной форсунки у стенок жаровой трубы создаётся повышенное давление. За счет пониженного давления по оси форсунки появляется возвратное течение ТВС (зона обратных токов). В результате около форсунки на любом режиме работы двигателя

организуется устойчивый вихрь тороидальной формы, в сечении которого всегда существует точка «Ф», в которой скорость движения фронта пламени равняется скорости движения ТВС (рис.1). В расплывленном конусе топлива образуется некоторое расслоение ТВС по коэффициенту избытка воздуха. Определяются две зоны возможного воспламенения: одна снаружи ближе к свече, а вторая внутри и принадлежит возвратному течению (рис. 2). Если плазма свечи воспламеняет только верхний слой хорошо горящей смеси, то горение выносится за пределы зоны обратных токов к турбине. Для воспламенения необходимо проникновение плазмы от свечи внутрь зоны обратных токов (рис. 3). Основной причиной незапуска двигателя на большой высоте является малый расход воздуха и топлива, уменьшающего конус распыла из-за пониженного давления в топливном коллекторе. Зона обратных токов имеет существенно меньшие размеры, чем при запуске на земле. Пульсирующая с частотой 4...12 Гц высоковольтная плазма просто не достигает топливо-воздушной смеси.

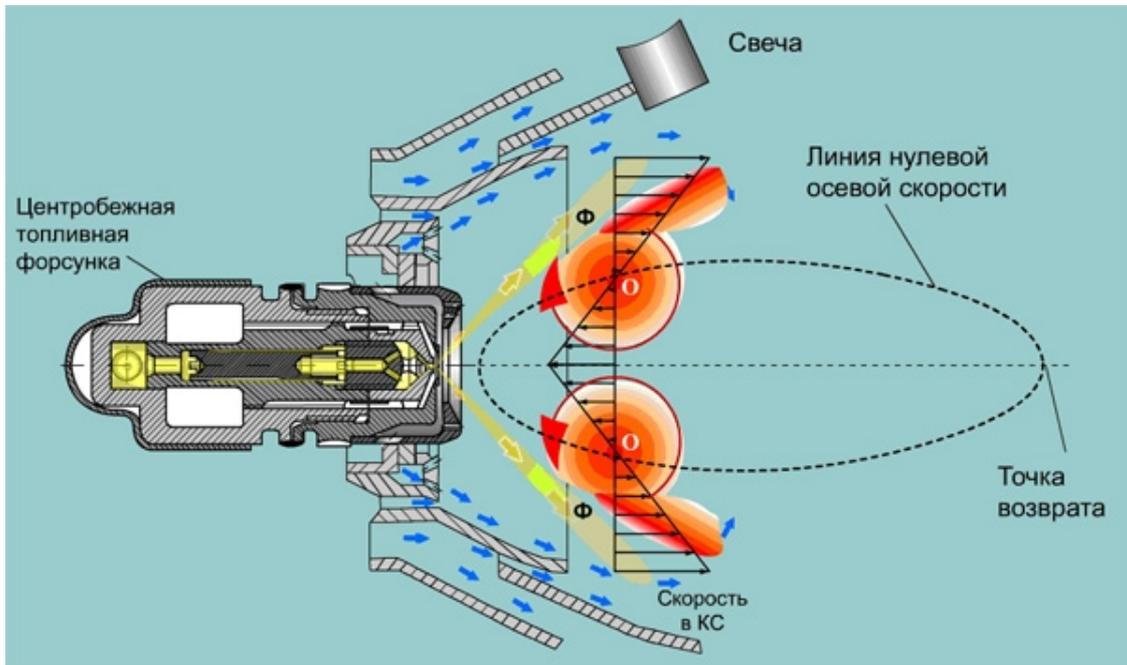


Рис. 1. Зона обратных токов у форсунки

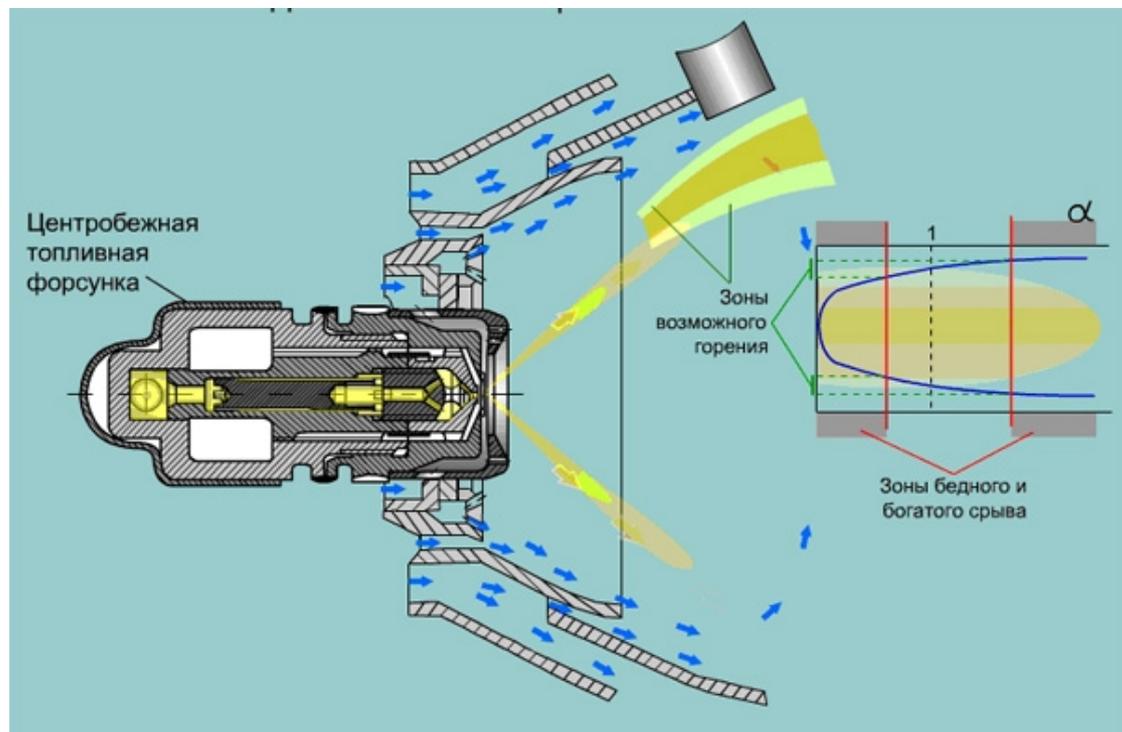


Рис. 2. Расслоение ТВС в конусе распыла топлива форсунки

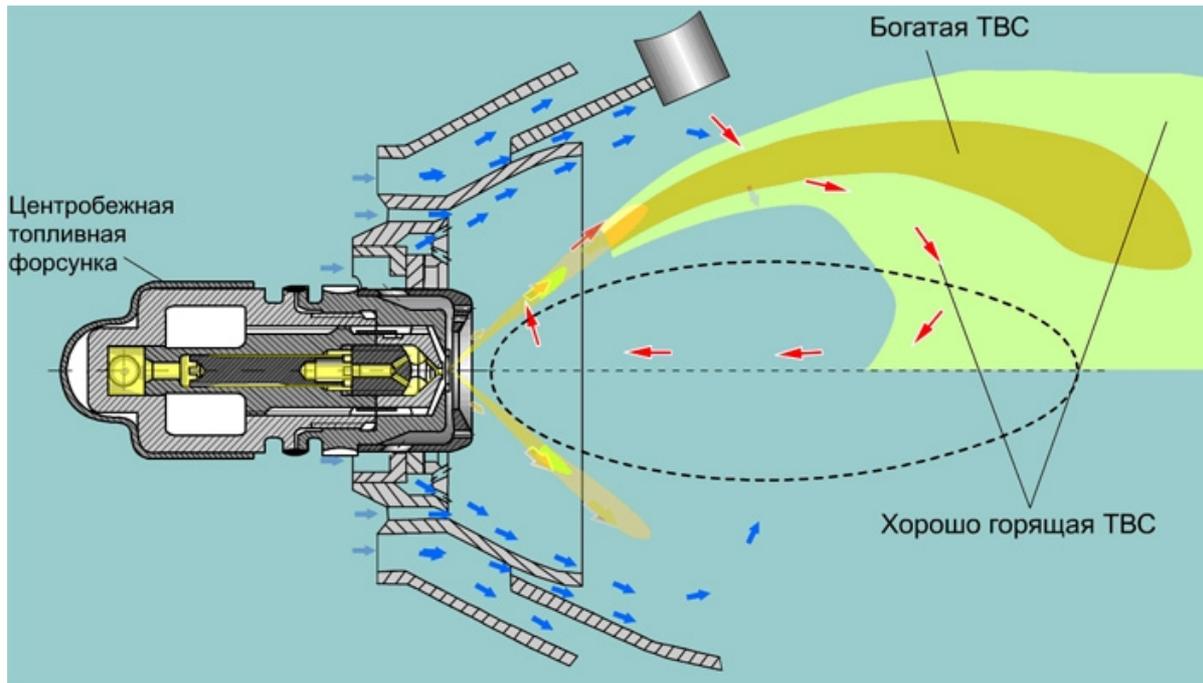


Рис. 3. Воспламенение при проникновении плазмы в зону обратных токов

### Роль кислорода в запуске КС

Для улучшения воспламенения топливо-воздушной смеси в камере сгорания в зазор между корпусом и свечой подаётся кислород.

Истекающий из зазора кислород своей кинетической энергией помогает переносу плазмы к зоне горения камеры сгорания (КС) и проникновению её в зону обратных токов пусковой форсунки.

Рассмотрим роль кислорода в изменении коэффициента избытка воздуха при запуске КС. Соотношением воздуха и топлива управляет автомат запуска или автомат приёмистости топливного насоса-регулятора (НР) в зависимости от частоты вращения ротора компрессора высокого давления. С подъёмом на высоту из-за снижения количества кислорода ещё дополнительно снижается количество топлива, подаваемого в камеру сгорания. Подаваемый кислород существенно повышает коэффициент избытка воздуха даже до «бедного срыва», как будет показано далее.

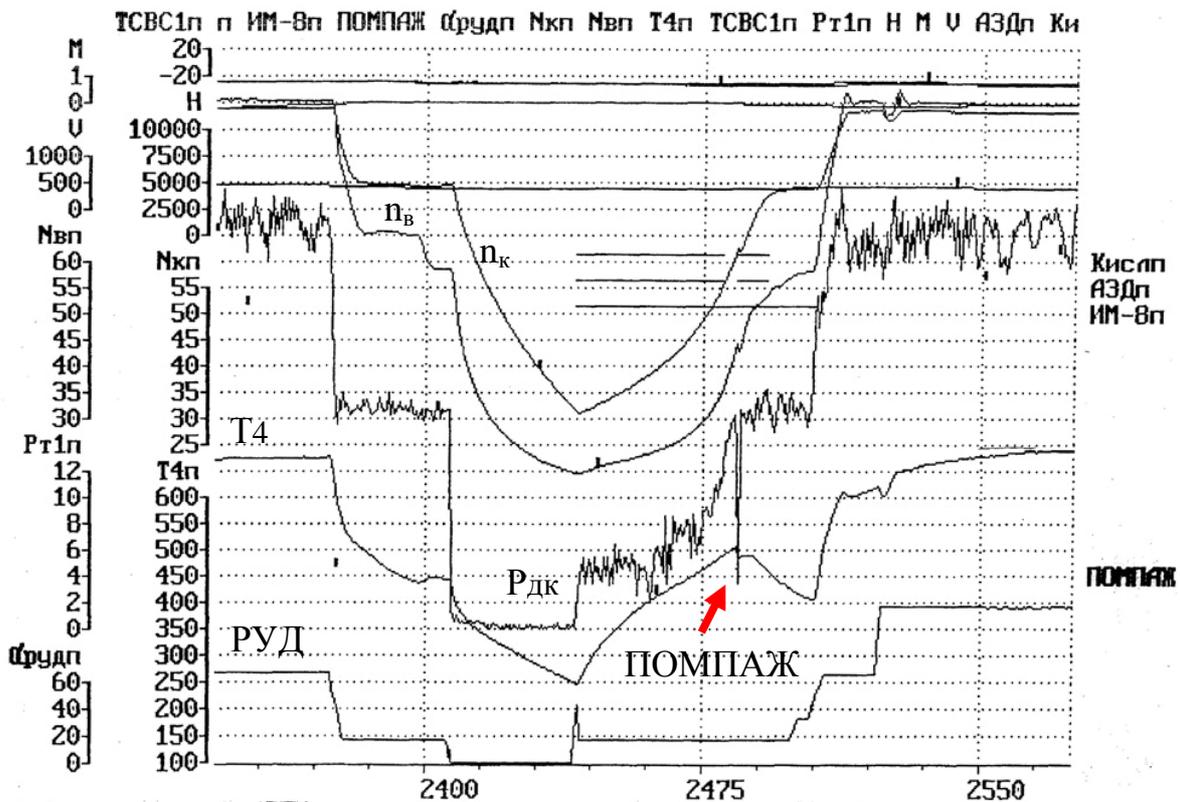
### Пример запуска двигателя на большой высоте

Рассмотрим встречный запуск двигателя РД-33 на высоте  $H=12\,469$  м при скорости  $V_{np}=401$  км/ч и при снижении частоты вращения ротора высокого давления (РВД) до  $n_k=30\%$  (рис. 4).

После установки РУД на упор СТОП и падения частоты вращения до  $n_k=30\%$  лётчик производил встречный запуск двигателя по штатной циклограмме установкой РУД на упор МГ. По мере движения РУДа и открытия стоп-крана в магистрали до распределителя топлива (РТ) возрастает давление, открывается клапан дополнительного коллектора (ДК) в РТ и происходит заполнение пускового коллектора топливом. Датчик регистрирует рост давления  $P_{дк}$ . Так как агрегат НР в соответствии с  $n_k$  определяет положение дозирующего крана и перепад на нём в зависимости от давления воздуха, то по мере движения РУД ещё до установки на упор МГ появляется давление в заполнившемся топливом коллекторе КС за счёт работы

наклонной шайбы насоса НР и регулятора перепада на дозирующем кране. Фактически топливо приходит к форсункам раньше высоковольтного зажигания и кислорода к свечам. После прохождения РУДом упора (микровыключателя) МГ появляется команда на зажигание (АЗД на рис.4), подачу кислорода (Кисл) и корректировку расхода топлива по высоте (ИМ-8п уменьшает расход топлива). Происходит устойчивый запуск двигателя при стабильном росте значений температуры Т4

и частоты вращения  $n_k$ . Однако при  $n_k = 60\%$  проходит сигнал «ПОМПАЖ» и за счёт срабатывания клапана сброса и останова (КСО) падает давление топлива. После снятия сигнала «ПОМПАЖ» давление топлива опять восстанавливается и темп приёмистости тоже. Но градиент нарастания температуры Т4 даже становится отрицательным, что свидетельствует об улучшении процесса горения в КС и снижении избытков топлива при работе автомата приёмистости агрегата НР.



Объект: 0111, Полет 100 от 19.09.2008; Рисунок 3 Запуск в воздухе, правый...106

Рис. 4. Запуск в воздухе. Запись данных полёта от 19.09.2008 г.

Объяснить сигнал «ПОМПАЖ» можно следующим образом. При запуске топливо поступает в камеру сгорания первым при открытии стоп-крана и воспламеняется свечей ещё до поступления кислорода. Пламя распространяется на все форсунки. Кислород значительно запаздывает из-за малого диаметра и значительной протяжённости магистралей. Пришедший кислород попадает в зону обратных токов (рис. 5), что приводит к

сильному обеднению ТВС. Так как расход топлива регулируется НР пропорционально расходу воздуха, а кислород подаётся из баллона через редуктор с постоянным давлением  $P=9 \text{ кгс/см}^2$ , его относительная величина растёт с высотой полёта. В результате пламя гаснет в зонах обратных токов у двух пусковых форсунок. Камера сгорания обеспечивает работу только 22 форсунок из 24.

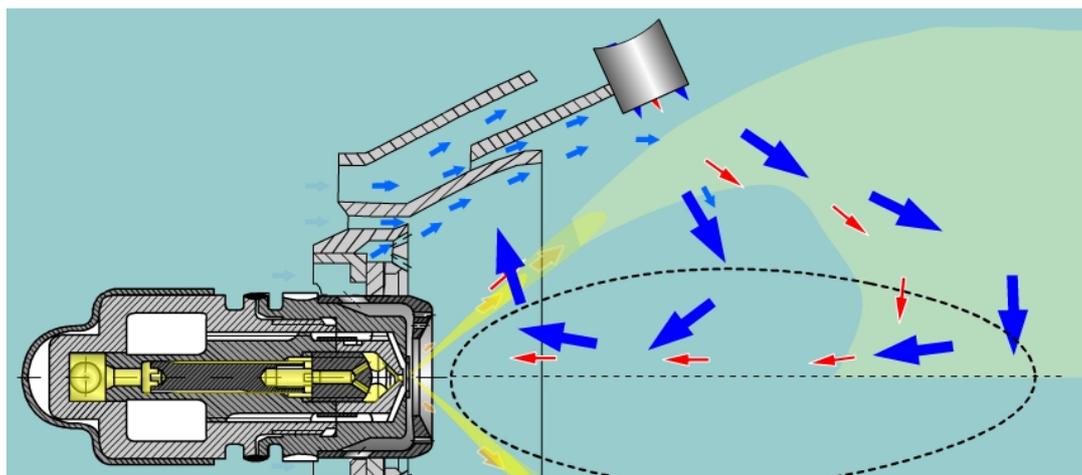


Рис. 5. Обогащение кислородом зоны обратных токов на запуске

Бедная ТВС от пусковых форсунок без горения покидает КС и уже далее в турбине получает возможность воспламениться за счёт смешения с горячим газом из соседних зон горения. Результат дожигания в турбине и за ней виден по росту температуры  $T_4$  до прохождения сигнала «ПОМПАЖ» (рис. 4).

На частоте вращения  $n_k=50\%$  включается зажигание и кислород. Ещё несколько секунд (4...6 с) процесс стабилен, но за счёт падения давления кислорода в магистралях восстанавливаются условия для горения ТВС в зонах обратных токов у пусковых форсунок и происходит воспламенение большого объёма подготовленной ТВС с броском давления в КС, регистрируемый сигнализатором помпажа СПТ-88 как «ПОМПАЖ».

Срабатывает КСО и отключает подачу топлива в РТ. После снятия команды «ПОМПАЖ» возобновляется подача топлива с тем же уровнем давления. Но горение теперь происходит эффективно у всех 24 форсунок. Это способствует снижению температуры  $T_4$  на термopарах. Запуск стабилизируется.

Кислород, поступающий при этом через свечу, не может привести ТВС у пусковых форсунок к «бедному срыву», поскольку расход воздуха в КС значительно вырос на частотах вращения более 60% и относительная доля кислорода снизилась.

## Выводы

1. Воспламенение в КС в полёте происходит до поступления кислорода в зону свечей. Запуск без кислорода возможен как на земле, так и в полёте.

2. Кислород является физическим переносчиком плазмы: за счёт энергии давления и расхода способствует проникновению плазмы в зону обратных токов, улучшая характеристики воспламенения. Запуск не станет хуже при использовании в тех же условиях сжатого воздуха, азота или другого инертного газа.

3. На запуске в зоне обратных токов пусковых форсунок кислород изменяет коэффициент избытка воздуха в сторону границы «бедной смеси», хотя автоматы запуска и приёмности в НР обеспечивают правильное соотношение для остальных форсунок.

4. На больших высотах полёта при запуске с постоянным расходом кислорода коэффициент избытка воздуха в зоне пусковых форсунок может превысить допустимое граничное значение для «бедной смеси» и горение у пусковых форсунок прекратится.

## Предложения по модернизации системы запуска

1. При испытании в полёте циклограмму поступления кислорода в зону свечей сдвинуть по времени на несколько

секунд. Рост частоты вращения и температуры после запуска КС должны блокировать подачу кислорода, что докажет его ненужность.

2. Расход кислорода должен изменяться в зависимости от высоты полёта и расхода воздуха, поступающего в КС, и составлять 0,4...0,5% от расхода воздуха в камере сгорания [1].

3. Вместо кислорода в свечи зажигания подавать сжатый воздух из пневматической системы на борту самолёта.

4. Использовать модернизированную свечу зажигания, обладающую лучшей «дальнобойностью» и энергоёмкостью за счёт горения в плазме дополнительного топлива.

### Модернизация свечи зажигания

Предлагается способ улучшения высотного запуска двигателя без кислорода, который основан на достаточно простой модернизации свечи и штатной системы зажигания двигателя.

Увеличивается энергетика импульса свечи за счёт подачи в зону образования плазмы холодного сжатого воздуха, а горение дополнительного топлива увеличит глубину проникновения продуктов горения в зону обратных токов камеры сгорания.

Для высотного запуска и запуска на земле вместо кислорода подаётся сжатый воздух (рис. 6).

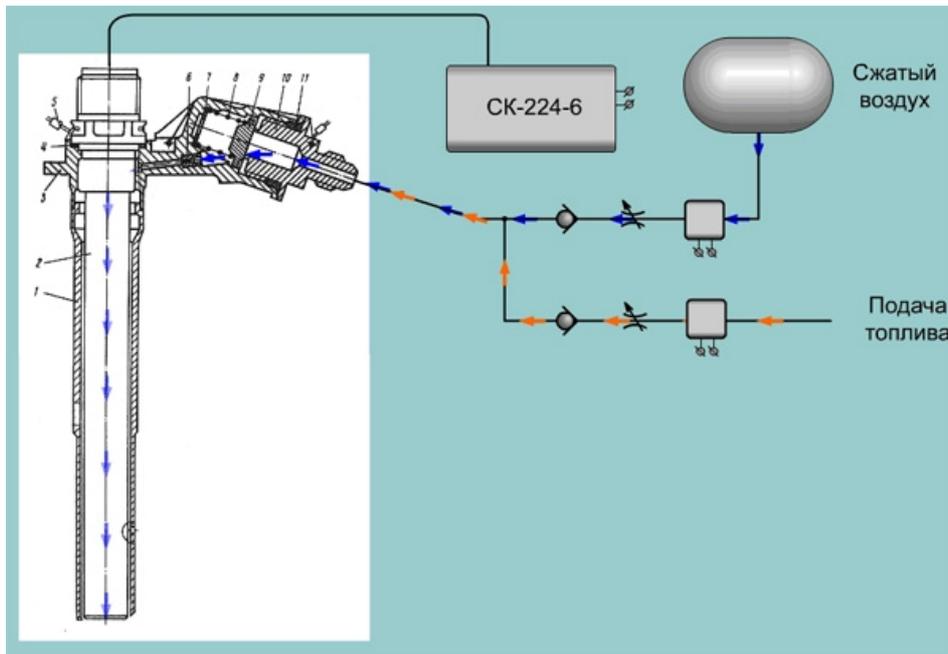


Рис. 6. Схема питания свечи зажигания воздухом и топливом

Давление воздуха подбирается экспериментально, а также подбирается расход дополнительного воздуха за счёт замены жиклёра 6. В поток сжатого воздуха можно импульсно подавать топливо от агрегата НР для образования паровой фазы. Сжатый воздух проходит по каналу внутри свечи и попадает в искровой зазор свечи А, где происходит высоковольтный разряд (рис. 7). Если периодически в воздух через клапан подавать некоторое ко-

личество паров топлива, то химическая реакция горения добавит энергии и продолжительности «выстреливающему» воздуху, что будет являться фактически «огневой дорожкой» для воспламенения зоны обратных токов в КС (рис. 8). Для создания цикла впрыска топлива, как на двигателе НК-25, используется клапан в топливной магистрали воспламенителя, который с частотой 1 Гц открывает доступ топлива в зону смешения с воздухом.

Этим обеспечивается временное достижение стехиометрического соотношения в зоне горения и высокой температуры продуктов сгорания.

При выполнении описанной доработки можно ожидать расширения границ высот и скоростей области запуска КС.

### Библиографический список

1. Лефевр, А. Процессы в камерах сгорания ГТД [Текст] / А. Лефевр – М.: МИР, 1986.



Рис. 7. Модернизированная свеча с центральным подводом воздуха и топлива

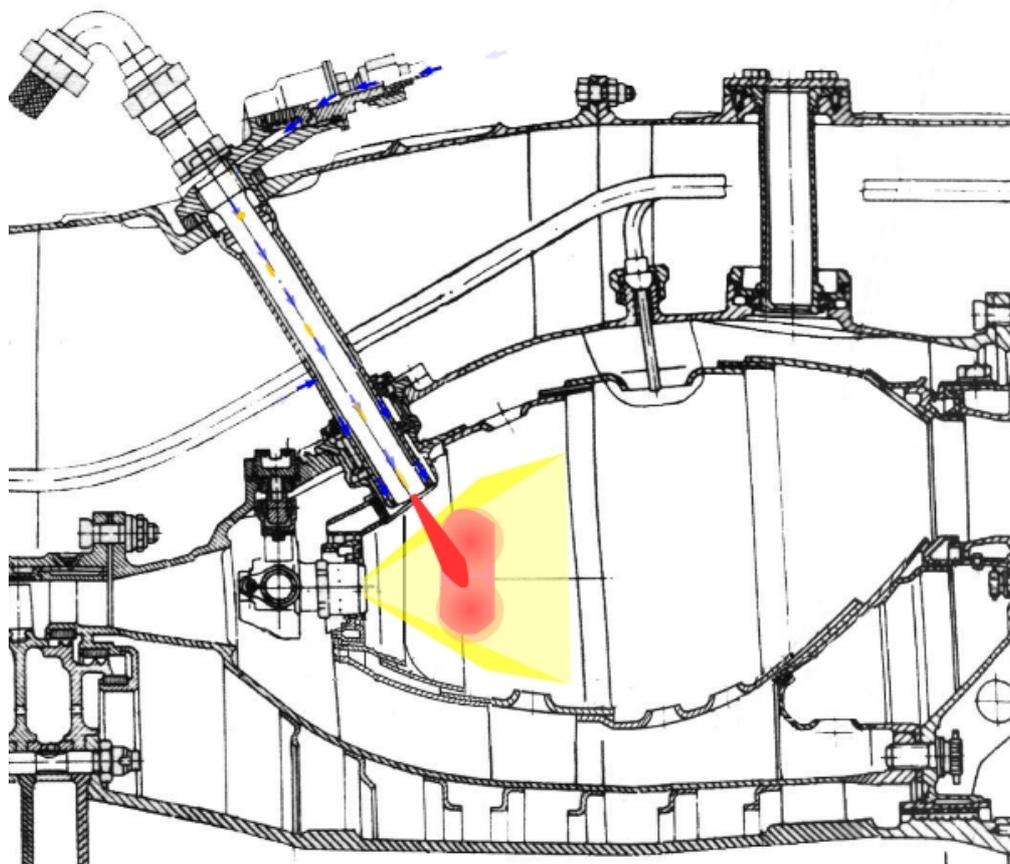


Рис. 8. Увеличение глубины «пробоя» новой свечи

## SOME PECULIARITIES OF HIGH-ALTITUDE STARTING OF ENGINES OF THE RD-33 TYPE

© 2012 S. V. Kotsyubinsky<sup>1</sup>, Yu. A. Ravikovich<sup>2</sup>

<sup>1</sup>“Klimov“ plc

<sup>2</sup>Moscow Aviation Institute (MAI) (National Research University)

Some peculiarities of high-altitude starting of engines of the RD type using oxygen are described in the paper. Negative influence of oxygen feeding of spark plugs in reverse current zones of starting jets in the main combustion chamber has been discovered on the basis of analyzing the data of several flights. It is suggested that the engine start cyclogram be changed with the time of oxygen feed shifted. We propose to feed compressed air from the airborne pneumatic system instead of oxygen to the spark plugs. It is also suggested that the spark plug and the ignition system be modernized to improve flame elongation and the efficiency of break-down into the reverse current area of the starting jets.

*Engine start in-flight, exclusion of oxygen feeding, spark plug modernization.*

### Информация об авторах

**Коцюбинский Сергей Вадимович**, кандидат технических наук, начальник отдела, ОАО «Климов». E-mail: [kotsubinski@mail.ru](mailto:kotsubinski@mail.ru). Область научных интересов: организация процессов распыливания жидкостей, процессов горения в камерах сгорания.

**Равикович Юрий Александрович**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой, Московский авиационный институт (МАИ) (национальный исследовательский университет); e-mail: [yurav@mai.ru](mailto:yurav@mai.ru). Область научных интересов: проектирование и исследование агрегатов и элементов турбомашин.

**Kotsubinsky Sergey Vadimovich**, candidate of technical science, head of department, “Klimov“ plc. E-mail: [kotsubinsky@mail.ru](mailto:kotsubinsky@mail.ru). Area of research: organization of liquid spraying processes, combustion processes in combustion chambers.

**Ravikovich Yury Alexandrovich**, doctor of technical science, professor, head of department, Moscow Aviation Institute (MAI) (National Research University). E-mail: [yurav@mail.ru](mailto:yurav@mail.ru). Area of research: design and research of units and elements of turbomachines.