

## ВЫНУЖДЕННОЕ ЗАЖИГАНИЕ ТОПЛИВНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

© 2010 А. М. Ланский, С. В. Лукачёв, С. Г. Матвеев

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Рассмотрены особенности вынужденного зажигания топливно-воздушной смеси в камерах сгорания малоразмерных газотурбинных двигателей (ГТД). Разработаны физическая и математические модели. Установлены закономерности и оценены диапазоны устойчивого воспламенения однородной и двухфазной топливно-воздушной смеси.

*Воспламенение, камеры сгорания, малоразмерные газотурбинные двигатели, физическая и математические модели.*

Вынужденное зажигание топливно-воздушной смеси (ТВС) в камерах сгорания является сложным многостадийным явлением, определяющимся физико-химическими процессами, протекающими в первичной зоне. В силу многообразия конструктивных схем последней и влияющих факторов исследовать рассматриваемый процесс в полной мере не представляется возможным. Поэтому, как правило, в практике изучения теории горения используется приём упрощения рассматриваемого явления и изучения отдельных составляющих его элементарных процессов. Как показывают выполненные исследования и опыт доводки запуска камер сгорания, изучение процессов вынужденного зажигания ТВС целесообразно проводить во взаимосвязи отдельных стадий явления друг с другом [1-3].

Для формирования представления о физической картине зажигания использовались данные различных исследований. Поскольку в них не встречались эксперименты с зоной обратных токов, были поставлены дополнительные эксперименты. На моделях, имитирующих первичную зону камеры сгорания (КС), проведена визуализация процесса зажигания и распространения пламени (рис. 1-3), изучено изменение времени задержки воспламенения  $\tau_{зд}$  в зависимости от конструктивных и режимных параметров. Это позволило впервые качественно описать

физическую картину зажигания ТВС в камере сгорания от искрового источника.

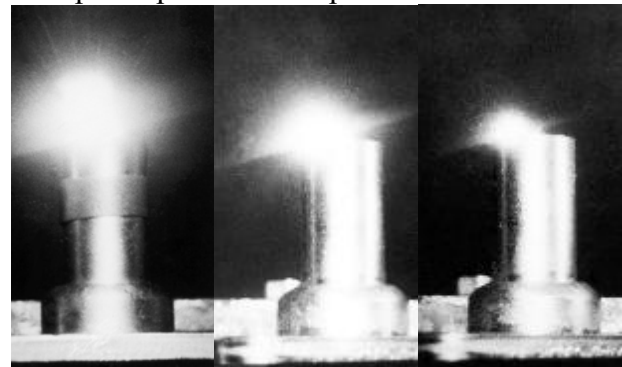
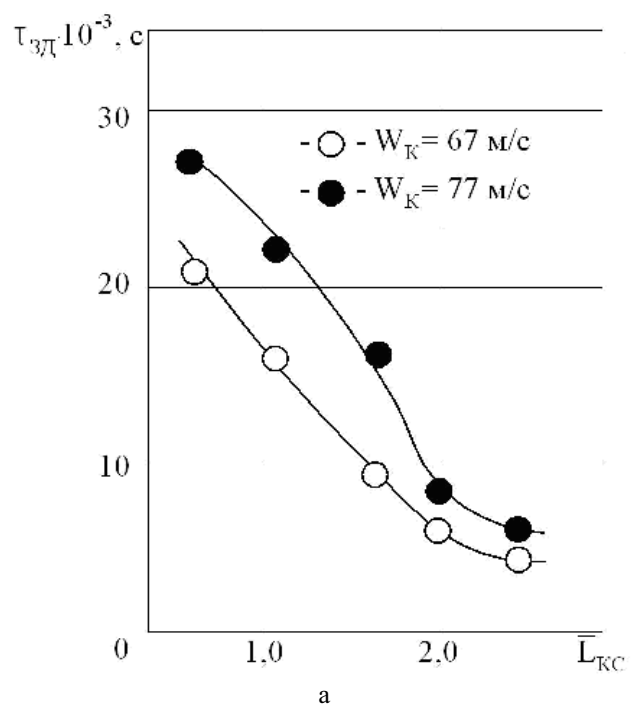


Рис. 1. Визуализация процесса формирования начального очага воспламенения у свечи зажигания в неподвижной смеси



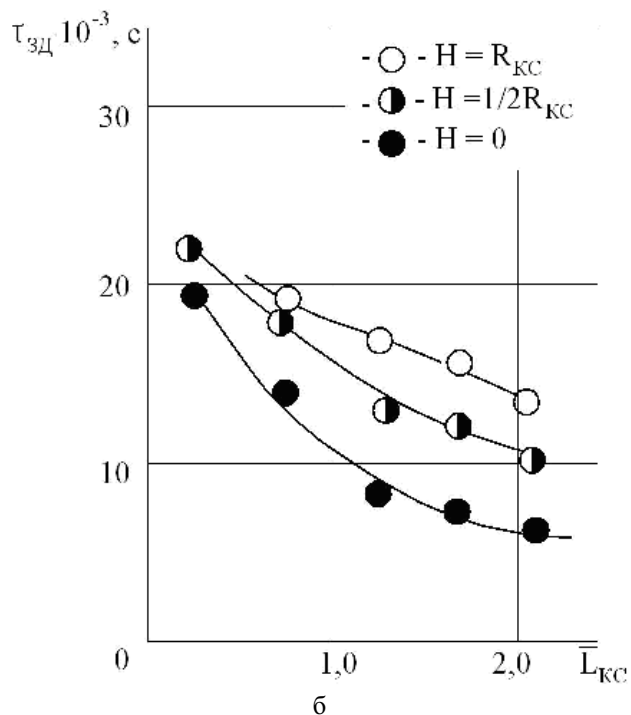


Рис. 2. Изменение времени задержки воспламенения ТВС в зависимости от режимных и конструктивных параметров

а – коэффициент избытка воздуха  $\alpha_K = 0,9$ ;

относительная длина камеры сгорания  $\bar{L}_{KC} = 1,5$ ;

диаметр камеры сгорания  $D_{KC} = 0,056$  м; степень

загромождения сечения  $\bar{B}_\Gamma = 0,4$

б –  $\alpha_K = 0,9$ ;  $\bar{B}_\Gamma = 0,4$ ;  $D_{KC} = 0,056$  м; относительное

расстояние свечи от стабилизатора  $\bar{L}_{CB} = 1,5$ ;

скорость потока воздуха на входе в модель  $W_K = 67$  м/с

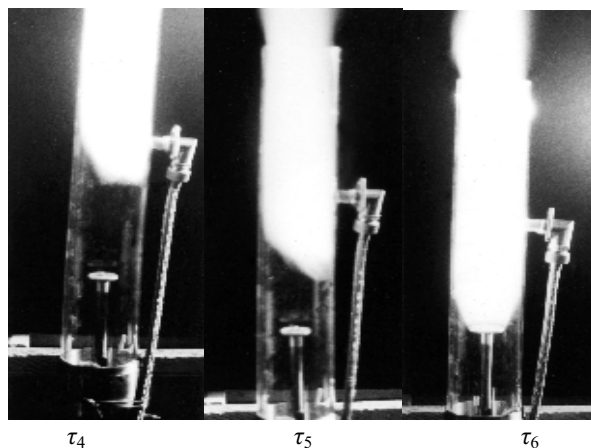
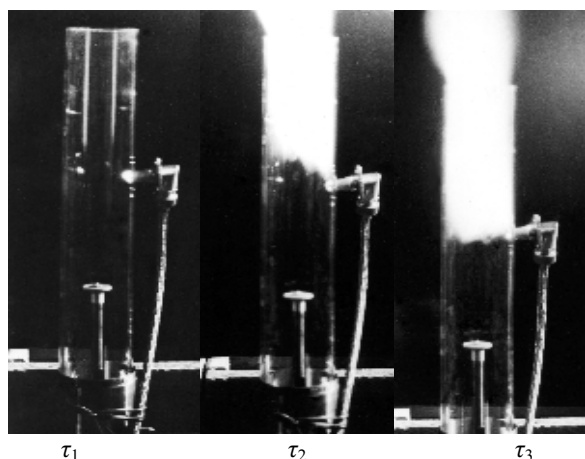


Рис. 3. Визуализация процесса воспламенения ТВС и распространения пламени в модели КС во времени  $\alpha_K = 0,95$ ;  $D_{KC} = 0,056$  м;  $T_K^* = 273$  К;  $\bar{B}_\Gamma = 0,2$ ;  $W_K = 56,7$  м/с  $\tau_1 < \tau_2 < \tau_3 < \tau_4 < \tau_5 < \tau_6$

Если скорость выделения тепла при горении превышает скорость его теплоотвода, то процесс развивается и пламя распространяется по объёму первичной зоны, и наоборот, если скорость выделения тепла меньше скорости теплоотвода, то он затухает.

Учитывая, что скорость тепловыделения определяется величиной коэффициента избытка воздуха вблизи свечи, размером и температурой начального очага, а скорость теплоотвода определяется местной скоростью потока и избытком топлива в зоне воспламенения ТВС, то можно записать следующее условие возникновения начального очага во временной форме:

$$\tau_{CM} \sim \tau_{XP} + K_1 \cdot \tau_{ИСП},$$

где:  $\tau_{CM} = \frac{dq}{W_{CB}}$  – время турбулентного смешения,

$\tau_{XP} = \frac{b \times \exp(E/RT_\Gamma)}{\alpha_{CB} \times \rho_\Gamma}$  – время химической реакции,

$\tau_{ИСП} = \frac{D_{32}}{\beta \times \alpha_{CB}}$  – время испарения.

Однако дальнейшее развитие процесса воспламенения в первичной зоне КС определяется не только условиями в потоке топливно-воздушной смеси вблизи свечи, но и от того, будет ли вовлечено пламя в зону обратных токов. Как показали визуальные

наблюдения (рис. 3) и измерения  $\tau_{зд}$ , по длине КС процесс воспламенения смеси в первичной зоне заканчивается в зоне обратных токов. Причём пламя вовлекается в неё с кормовой части. Это обстоятельство наглядно свидетельствует о том, что кроме формирования устойчивого начального очага пламени необходимо обеспечить его проникновение в зону обратных токов (ЗОТ), в противном случае пламя будет сноситься по потоку. Поэтому для устойчивого развития процесса необходимо обеспечить условие передачи пламени в ЗОТ, которое, исходя из простых физических представлений, можно записать в следующем виде:

$$\frac{W_{CB}}{U_H} \leq \frac{(L_{ЗОТ} - L_{CB})}{(R_{КС} - R_{ЗОТ})}.$$

Кроме того, в зоне обратных токов должны быть созданы условия для воспламенения ТВС. Они зависят от состава смеси и интенсивности обменных процессов. Если воспользоваться подходом по аналогии с одной из общепринятых моделей стабилизации пламени, то устойчивое воспламенение смеси в ЗОТ состоится при условии, когда время пребывания  $\tau_{пр}$  в ней будет больше времени воспламенения ТВС, т. е.  $\tau_{хр}$ . Тогда на границе воспламенения должно выполняться условие:

$$\frac{\tau_{пр}}{\tau_{хр}} = \frac{D_{ЗОТ} \times U_H^2}{W_{ЗОТ} \times a} = M_i^{ВОСП},$$

где  $D_{ЗОТ}$ ,  $W_{ЗОТ}$  – соответственно диаметр и скорость в зоне обратных токов,  $U_H$  – нормальная скорость распространения пламени,  $a$  – коэффициент температуропроводности,  $M_i^{ВОСП}$  – критерий Михельсона на границе воспламенения.

Таким образом, условия воспламенения смеси в первичной зоне камеры сгорания можно записать в следующем виде:

$$\tau_{см} \sim \tau_{хр} + K_1 \cdot \tau_{исп},$$

$$\frac{W_{CB}}{U_H} \leq \frac{(L_{ЗОТ} - L_{CB})}{(R_{КС} - R_{ЗОТ})},$$

$$\frac{\tau_{пр}}{\tau_{хр}} = \frac{D_{ЗОТ} \times U_H^2}{W_{ЗОТ} \times a} = M_i^{ВОСП}.$$

Данные выражения описывают стадии процесса воспламенения в первичной зоне за стабилизатором. Если сформировать единый комплекс, описывающий весь процесс в целом, то необходимо выполнить следующие преобразования:

$$\frac{\tau_{пр} \times U_H^2}{a} = M_i^{ВОСП},$$

$$U_H = \sqrt{M_i^{ВОСП} \times \frac{a}{\tau_{пр}}}.$$

Проведя преобразования, получим следующее уравнение:

$$W_{CB} = K_2 \times \sqrt{M_i^{ВОСП} \times \frac{a}{\tau_{пр}} \times \frac{(1 - \bar{L}_{CB})}{(1 - \sqrt{B_\Gamma})}},$$

$$\text{где: } K_2 = L_{ЗОТ} / R_{КС}, \quad B_\Gamma = D_{СТ}^2 / D_{КС}^2.$$

Используя последнее выражение, условие зажигания ТВС в первичной зоне можно представить в виде

$$\frac{d_q}{\sqrt{\frac{a}{\tau_{пр}}}} = K_3 \times (\tau_{хр} + K_1 \tau_{исп}) \times f(\bar{L}_{CB}, B_\Gamma).$$

Данная зависимость описывает условия зажигания смеси в первичной зоне камеры сгорания с учётом её конструктивных особенностей и массообменных свойств зоны обратных токов. Однако для её практического применения необходимо изучить влияние отмеченных выше факторов на границу воспламенения и их предельные значения.

### Влияние местоположения источника зажигания, конструктивных и режимных параметров на воспламенение однородной и двухфазной ТВС

Воспламенение топливно-воздушной смеси и распространение пламени в первичной зоне камеры сгорания зависит от многих факторов: аэродинамической структуры течения, местоположения источника воспламенения, физико-химических свойств топлива и качества подготовки ТВС. Для упрощения рассматриваемой задачи на первом этапе исследований изучалось вынужденное зажигание однородной смеси. На рис. 4 приведены границы воспламенения однородной ТВС за плохообтекаемым телом при изменении местоположения источника зажигания ( $\bar{L}_{СВ}$ ) и диаметра модели камеры сгорания ( $D_{КС}$ ). При некоторой концентрации топлива они достигают максимального значения и монотонно уменьшаются при изменении состава смеси в сторону её обеднения или обогащения.

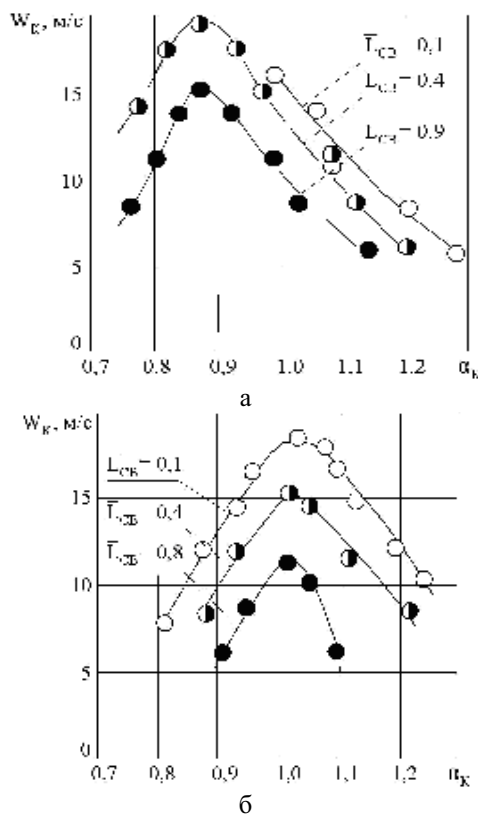


Рис. 4. Границы воспламенения однородной ТВС за плохообтекаемыми телами

а –  $T_K^* = 273\text{K}$ ;  $D_{КС} = 0,035\text{м}$ ;  $\bar{B}_Г = 0,3$

б –  $T_K^* = 273\text{K}$ ;  $D_{КС} = 0,056\text{м}$ ;  $\bar{B}_Г = 0,3$

Причём максимум скорости ( $W_K^{\text{ПРЕД}}$ ) смещён в сторону избытка содержания топлива и соответствует  $\alpha_K \approx 0,85...0,95$ . Последнее значение совпадает, как следует из ряда работ, с оптимальным значением для турбулентной скорости распространения пламени и свидетельствует о том, что  $W_K^{\text{ПРЕД}}$  определяется кинетическими факторами, т.е. скоростью химической реакции. Это обстоятельство легко объясняется с позиций тепловой теории воспламенения. Исходя из уравнения теплового баланса для возгорающегося объёма, Д. А. Франк-Каменецкий получил следующее выражение:

$$\frac{1}{\tau_{зд}} = \frac{1}{\tau_{инд}} - \frac{1}{\tau_{Т_0}},$$

где  $\tau_{инд}$  – адиабатический период индукции – характерное время саморазогрева реагирующей смеси, определяющееся температурой и концентрациями реагентов;  $\tau_{Т_0}$  – характерное время теплообмена, уменьшающееся с интенсификацией теплообмена. При возрастании скорости потока характерное время теплообмена уменьшается, значение  $1/\tau_{Т_0}$  возрастает и при некотором значении скорости становится сравнимым с  $l/\tau_{инд}$ , время задержки воспламенения в этом случае стремится к бесконечности и воспламенение становится невозможным.

Характер влияния местоположения источника зажигания одинаков для различных размеров модели. С увеличением  $\bar{L}_{СВ}$  (рис. 5) предельное значение скорости  $W_K^{\text{ПРЕД}}$  уменьшается, а концентрационные границы по  $\alpha_K$  сужаются. Это объясняется тем, что по мере удаления источника зажигания от фронтального устройства (стабилизатора) ухудшаются условия проникновения пламени в зону обратных токов из-за увеличивающихся потерь тепла от источника зажигания. Что касается размеров системы, то с уменьшением  $D_{КС}$  предельные значения  $W_K^{\text{ПРЕД}}$  и  $\alpha_K^{\text{max}}$  при прочих равных условиях уменьшаются (рис. 5). Причём степень влияния на предельные значения скорости больше, чем на  $\alpha_K^{\text{max}}$ . Это свидетельствует о том, что определяющим фактором в данном случае

является условие воспламенения и распространения пламени в основном потоке.

Как отмечалось ранее, в первичной зоне КС с помощью различных конструкций фронтных устройств (угловых стабилизаторов, завихрителей и т.д.) формируется аэродинамическая структура течения. Если первичный воздух закрутить с

помощью лопаточных завихрителей с различными углами установки лопаток, то реализуется ЗОТ различной интенсивности и размеров. Проведённые исследования показали, что характерной особенностью протекания границ воспламенения однородной закрученной ТВС в данном случае является незначительное влияние на них местоположения свечи (рис. 6).

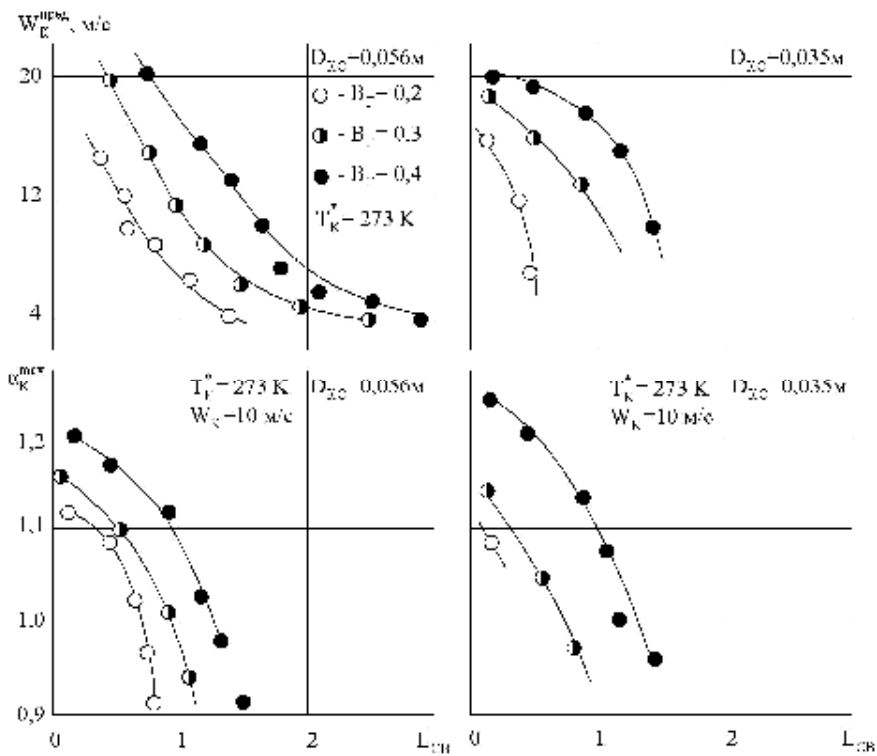


Рис. 5. Влияние местоположения источника зажигания и степени загромождения на предельные значения границ воспламенения однородной ТВС за плохообтекаемым телом ( $\bar{L}_{CB} = L_{CB}/L_{КС}$ )

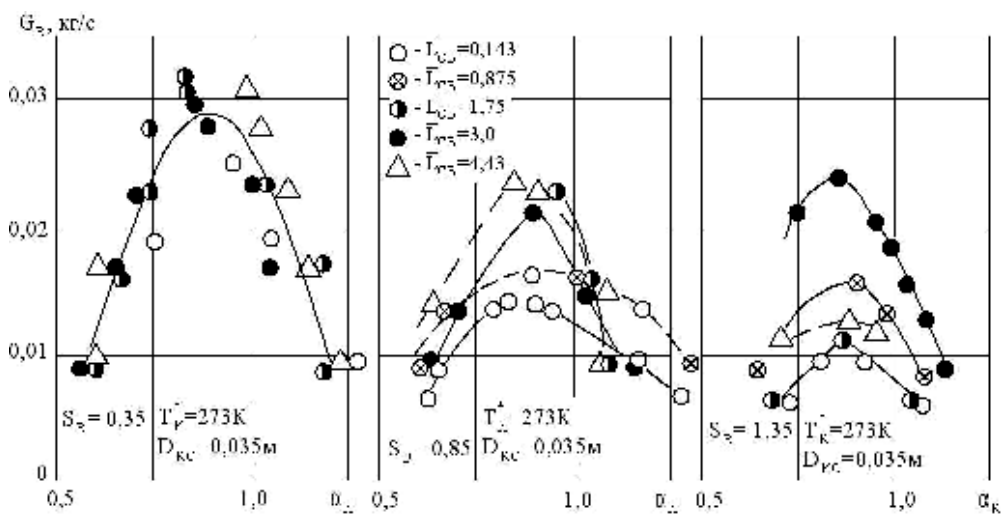


Рис. 6. Границы воспламенения однородной ТВС в закрученном потоке при изменении  $\bar{L}_{CB}$  и  $S_B$

Причём с увеличением закрутки предельное значение расхода воздуха уменьшается, что объясняется обеднением зоны обратных токов за счёт подпитки её воздухом из окружающей смеси. Что касается влияния местоположения свечи, то  $G_{В}^{ПРЕД}$  отслеживает конфигурацию ЗОТ. Чем больше интенсивность закрутки, тем меньше значение  $G_{В}^{ПРЕД}$ .

Как правило, при исследовании воспламенения ТВС особое внимание уделяется предельным значениям  $W_{КС}^{ПРЕД}$  и  $\alpha_{К}^{max}$ , при которых возможно устойчивое воспламенение.

Это объясняется тем, что они характеризуют предельные возможности воспламенения ТВС, и процесс доводки пусковой характеристики КС связан с их расширением в тех или иных условиях работы. Поэтому особый интерес имеют выполняемые в этом направлении обобщения экспериментальных данных. На рис. 7,а приведены результаты обобщения предельной скорости потока  $W_{КС}^{ПРЕД}$  на границе воспламенения в зависимости от положения свечи  $\bar{L}_{СВ}$  при различных значениях конструктивных параметров ( $D_{КС}$  и  $B_{Г}$ ), которые характеризуют предельные возможности камеры сгорания по воспламенению:

$$W_{КС}^{ПРЕД} = f(K_{\alpha}, \bar{L}_{СВ}),$$

где  $K_{\alpha} = f(\alpha_{К})$ .

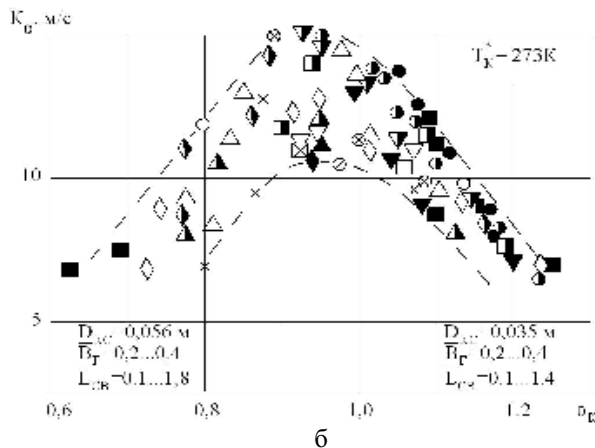
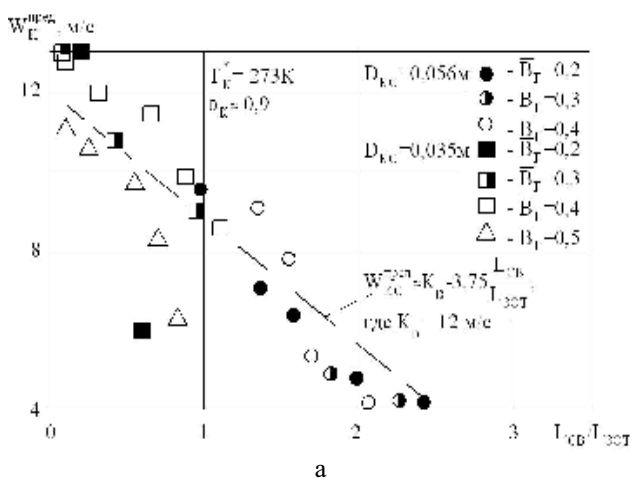


Рис. 7. Обобщение предела воспламенения однородной ТВС в моделях КС по скорости

Изменение  $K_{\alpha}$  от состава смеси на границе воспламенения приведено на рис. 7,б. Следует отметить, что характер протекания зависимости  $K_{\alpha} = f(\alpha_{К})$  подобен изменению  $U_{Т} = f(\alpha_{К})$ . Как видно, при удалении источника воспламенения от фронтального устройства ( $\bar{L}_{СВ} \uparrow$ ) предельное значение скорости, при котором происходит устойчивое воспламенение однородной ТВС, уменьшается.

Используя предположение о тепловом механизме воспламенения, эту зависимость можно представить в следующем виде:

$$\frac{K_{\alpha} - W_{КС}}{3,75 \times \bar{L}_{СВ}} : \frac{E_{П}}{E_{Р}} = const.$$

Из приведённого выражения следует, что существуют определённые условия баланса между потребной и располагаемой энергией воспламенения, которые определяют  $W_{КС}^{ПРЕД}$ . При уменьшении располагаемой энергии ( $E_{Р}$ ) для обеспечения воспламенения необходимо уменьшить скорость набегающего потока или увеличить турбулентную скорость распространения пламени ( $K_{\alpha}$ ) путём известных мероприятий. Кроме того, анализ зависимостей (рис. 7) показывает, что наблюдается существенный разброс экспериментальных данных, который можно объяснить тем, что при обобщении не учитывались процессы массообмена в первичной зоне.

Поэтому на основе использования известных соотношений для времени

пробытия в ЗОТ и экспериментальные данные были обобщены в следующем виде:

$$\frac{K_{\alpha} - 100 \sqrt{\frac{a}{\tau_{\text{пр}}}}}{3,75 \times L_{\text{св}}} = \text{const}.$$

Как следует из рис. 8, в данном случае экспериментальные данные обобщаются значительно лучше.

Полученный параметр  $\left(-100 \sqrt{\frac{a}{\tau_{\text{пр}}}}\right)^{\text{ПРЕД}}$  по физическому смыслу представляет собой обобщённый комплекс, включающий в себя и аэродинамические показатели, и показатели состава топливно-воздушной смеси.

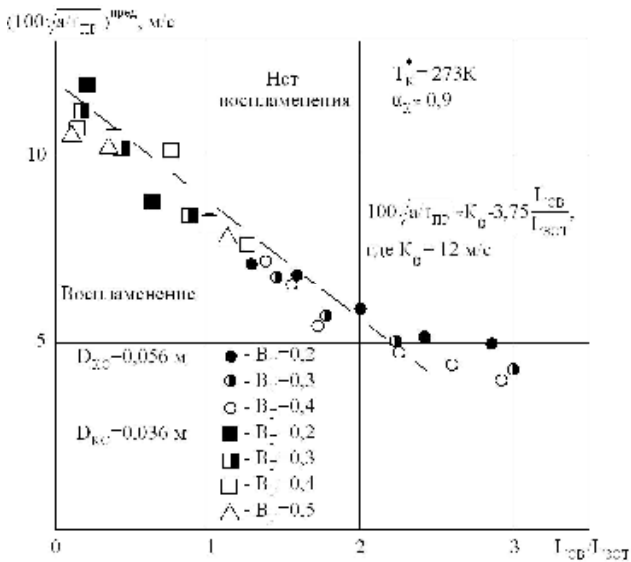


Рис. 8. Обобщение предела воспламенения однородной ТВС в моделях КС по скорости

В камерах сгорания ГТД топливо подаётся в капельно-жидком состоянии, и в объёме жаровой трубы реализуется горение двухфазных смесей. Если в общем виде сравнить воспламенение однородной и двухфазной ТВС, то в последнем случае кроме ранее рассмотренных факторов на пределы воспламенения влияют качество подготовки смеси и параметры топливного факела.

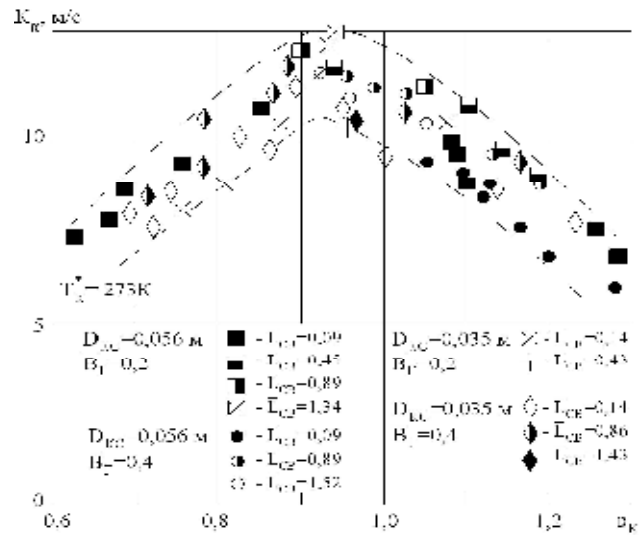
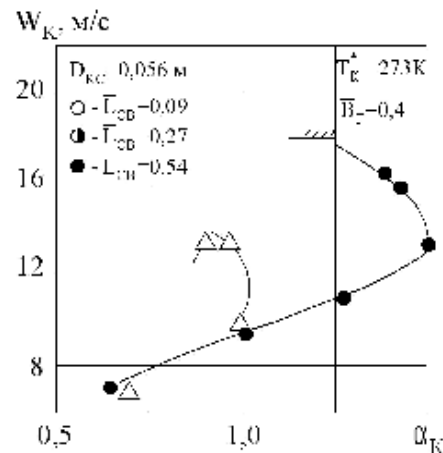


Рис. 9. Зависимость параметра  $K_{\alpha}$  от режимных, конструктивных параметров и состава смеси

Отмеченные обстоятельства наглядно проявляются в характере протекания границ воспламенения (рис. 10, 11). Так с увеличением скорости потока воздуха на входе в модель "бедная" граница воспламенения расширяется до некоторого значения  $\alpha_K = \alpha_K^{max}$  (рис. 10). Это объясняется тем, что отрицательное действие увеличения скорости воздушного потока на понижение температуры и скорости испарения в ядре искры более чем компенсируется улучшением качества подготовки ТВС и его испарением. При дальнейшем увеличении скорости диапазон по  $\alpha_K$  сужается и при некотором значении  $W_K$  смесь не воспламеняется.



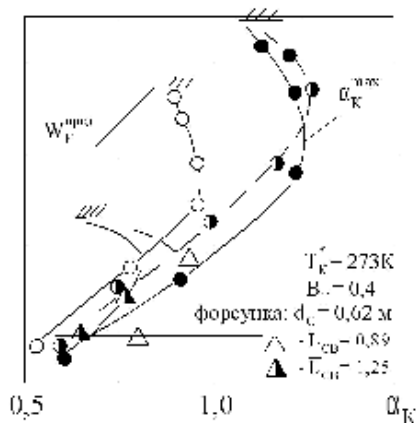


Рис. 10. Границы воспламенения двухфазной ТВС за плохообтекаемым телом при различных значениях  $\bar{L}_{СВ}$

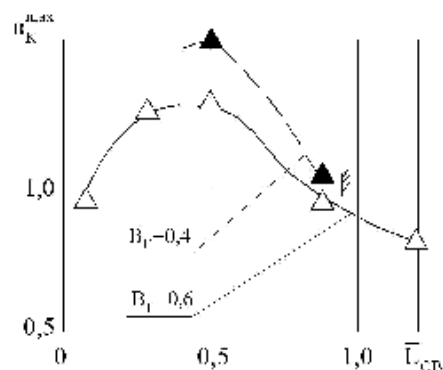


Рис. 11. Влияние местоположения источника зажигания на предельные значения границ воспламенения ТВС

Особое место при воспламенении двухфазной смеси занимает согласование местоположения источника воспламенения и угла топливного факела. Если для однородных смесей значение  $W_K^{ПРЕД}$  увеличивается с уменьшением расстояния источника зажигания от фронтального устройства, то для двухфазной смеси эта зависимость имеет максимум (рис. 11). Он совпадает с таким местоположением источника зажигания, которое соответствует углу раскрытия топливного факела, попадающего на свечу. В этом случае вблизи свечи реализуется переобогащенная топливом область, способствующая улучшению воспламенения ТВС.

На рис. 12 приведено сравнение диапазонов воспламенения однородной и двухфазной ТВС. Как показывает анализ экспериментальных данных, реализуется две области: А и Б. При увеличении  $\bar{L}_{СВ}$  от 0,1 до 0,5 наблюдается расширение границ воспламенения двухфазной смеси по сравнению с однородной.

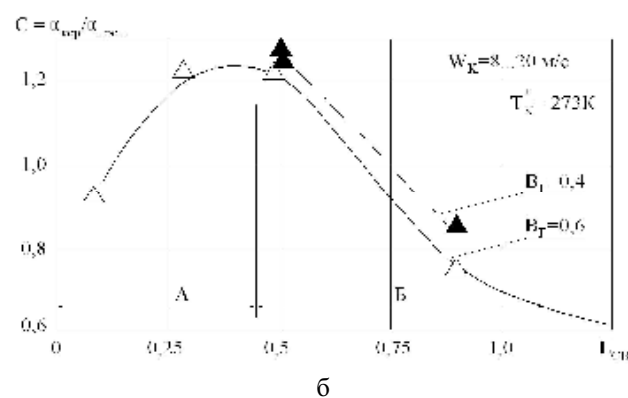
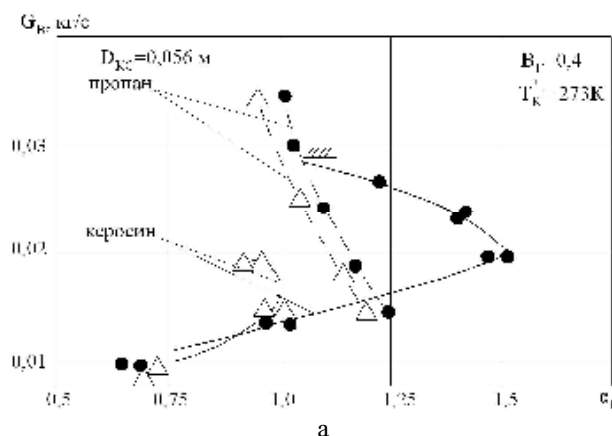
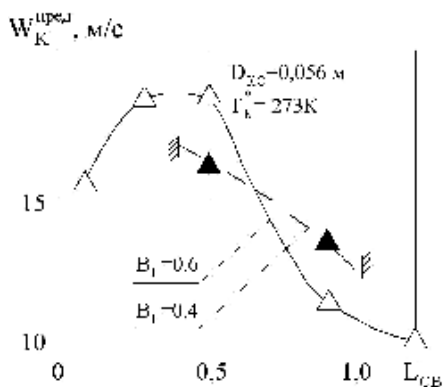


Рис. 12. Соотношение составов смеси на границе воспламенения для керосина и пропана



Для обобщения экспериментальных данных была использована ранее рассмотренная математическая модель, которая позволяет описать «бедную» границу воспламенения ТВС в виде зависимости

$$\tau_{CM} \approx K_3 (\tau_{ХР} + \kappa_1 \cdot \tau_{ИСП}).$$

При использовании данного уравнения необходимо определить размеры капель, которые определялись на основе оптических измерений и расчётным путем по эмпирической формуле:

$$d_{32} = 8,88 \cdot \sigma_T^{0,6} \cdot \nu_T^{0,6} \cdot G_T^{0,22} \cdot \Delta P_T^{-0,43}.$$

На рис. 13 приведены результаты сравнения расчётных и измеренных значений диаметра капель топлива.

В результате обобщения (рис. 14) получена корреляционная зависимость:

$$\tau_{CM} = K_{Вr} [0,0051 + 0,00522 \times (\tau_{ХР} + K_{\alpha_{св}} \times \tau_{ИСП})],$$

которая позволяет оценить границу устойчивого воспламенения двухфазной ТВС в модели с учётом степени загромождения сечения  $V_r$ .

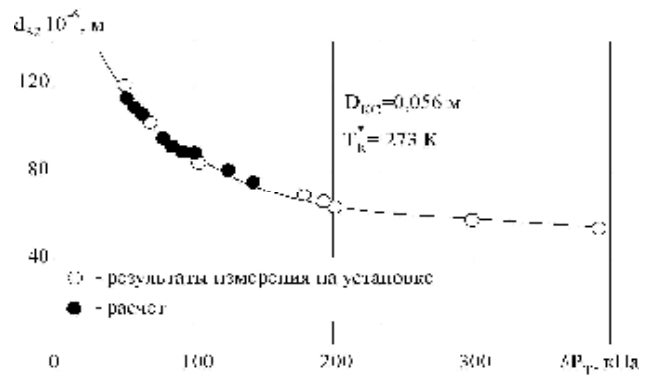


Рис. 13. Изменение диаметра капель топлива на границе воспламенения

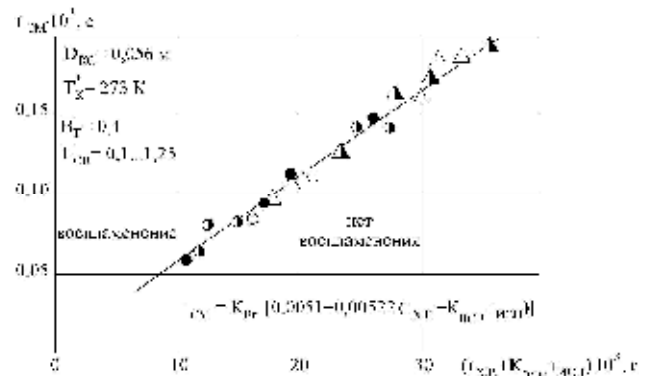


Рис. 14. Обобщение экспериментальных данных на границе воспламенения двухфазной ТВС

Полученные эмпирические зависимости позволяют на стадии проектирования камер сгорания выполнять предварительные оценки диапазонов устойчивого воспламенения однородной и двухфазной топливовоздушной смеси.

### Библиографический список

1. Лукачѐв, В. П. Рабочий процесс камер сгорания малоразмерных ГТД, проблемы и некоторые пути повышения его эффективности [Текст] / В. П. Лукачѐв, А. М. Ланский, В. Ю. Абрашкин [и др.] // Вест. СГАУ. Сер. Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей. – Самара, 1998. – Вып. 1. – С. 11-39.
2. Веппе, А. Б. Влияние параметров воздуха на запуск камер сгорания ГТД [Текст] / А. Б. Веппе, П. Г. Зубков, А. М. Ланский; Авиац. ин-т. – Куйбышев, 1990. – 9 с. – Деп. в ЦНТИ ГА 19.07.90, № 816-ГА90.
3. Веппе, А. Б. К вопросу моделирования процесса запуска камер сгорания ГТД [Текст] / А. Б. Веппе, П. Г. Зубков, А. М. Ланский; Авиац. ин-т. – Куйбышев, 1990. – 12 с. – Деп. в ЦНТИ ГА 22.11.90, № 822-ГА90.

### References

1. Lukatchev, V. P. Operation of small-sized gas-turbine engine combustion chambers, problems and some ways of increasing its efficiency / V. P. Lukatchev, A. M. Lanskiy, V. Yu. Abrashkin et al. // Vestnik of SSAU. Ser. Combustion and heat exchange processes, ecology of heat engines. – Samara, 1998. – No.1. – PP. 11-39.

2. Veppe, A. B. Impact of air parameters on the starting of gas turbine engine combustion chamber / A. B. Veppe, P. G. Zubkov, A. M. Lanskiy; Aviation institute. – Kuibyshev, 1990. – 9 p. – Dep. to Central Science and Engineering Institute of Civil Aviation 19.07.1990, No.816-GA90.

3. Veppe, A. B. Modelling the process of the starting of gas turbine engine combustion chamber / A. B. Veppe, P. G. Zubkov, A. M. Lanskiy; Aviation institute. – Kuibyshev, 1990. – 12 p. – Dep. to Central Science and Engineering Institute of Civil Aviation 22.11.1990, No.822-GA90.

## COMPULSORY IGNITION OF FUEL-AIR MIXTURE IN SMALL-SIZED GAS TURBINE ENGINE COMBUSTION CHAMBERS

© 2010 A. M. Lanskiy, S. V. Lukatchev, S. G. Matveyev

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov  
(National Research University)

The paper deals with the peculiarities of compulsory ignition of fuel-air mixture in small-sized gas turbine engine combustion chambers. Physical and mathematical models have been developed. The regularities of stable ignition of one-phase and two-phase fuel air mixture have been established and its range estimated.

*Ignition, combustion chambers, small-sized gas turbine engines, physical and mathematical models.*

### Информация об авторах

**Ланский Анатолий Михайлович**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплотехника и тепловые двигатели», Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет), заведующий лабораторией АСУ-ВУЗ СГАУ, [amlansky@ssau.ru](mailto:amlansky@ssau.ru). Область научных интересов: физика и моделирование рабочих процессов в камерах сгорания газотурбинных двигателей.

**Лукачев Сергей Викторович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теплотехника и тепловые двигатели», Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет), [lukachev@ssau.ru](mailto:lukachev@ssau.ru). Область научных интересов: физика и моделирование процессов горения в камерах сгорания газотурбинных двигателей.

**Матвеев Сергей Геннадьевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплотехника и тепловые двигатели», Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет), начальник планово-финансового управления СГАУ, [pfu@ssau.ru](mailto:pfu@ssau.ru). Область научных интересов: физика и моделирование процессов горения в камерах сгорания газотурбинных двигателей.

**Lanskiy Anatoly Mikhailovitch**, candidate of technical science, associate professor of the department “Heat engineering and heat engines”, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University), head of the laboratory Automatic Control Systems SSAU, [amlansky@ssau.ru](mailto:amlansky@ssau.ru). Area of research: physics and modelling of operating processes in combustion chambers of gas turbine engines.

**Lukatchev Sergey Victorovitch**, doctor of technical science, professor, head of the department “Heat engineering and heat engines”, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University), [lukachev@ssau.ru](mailto:lukachev@ssau.ru). Area of research: physics and modelling of operating processes in combustion chambers of gas turbine engines.

**Matveyev Sergey Gennadyevitch**, candidate of technical science, associate professor of the department “Heat engineering and heat engines”, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University), head of the financial department of SSAU, [pfu@ssau.ru](mailto:pfu@ssau.ru). Area of research: physics and modelling of operating processes in combustion chambers of gas turbine engines.