

ния содержания оксидов азота ($NO_{\text{рецикл}}/NO$) в ОГ от величины процента холодной и горячей рециркуляции. Из этих зависимостей видно, что при 25% рециркуляции горячих ОГ на пределе воспламенения $\alpha = 1,32$ содержание оксидов азота в ОГ снижается также, как при рециркуляции 19% горячих ОГ + 1,9% H_2 . Холодная рециркуляция приводит к более значительному снижению как величины максимальной температуры сгорания, так и содержания оксидов азота. Так при добавке 19% холодных ОГ и 1,9% водорода концентрация оксидов азота снизится приблизительно в два раза по сравнению с добавкой горячих ОГ при этих же условиях. Нижняя кривая построена по экспериментальным данным работы [1], поэтому в реальных условиях есть основания ожидать более значительного снижения содержания оксидов азота.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. З в о н о в В.А. Токсичность двигателей внутреннего сгорания. – М.: Машиностроение, 1981. — 160 с.
2. Пределы стабильного сгорания бензовоздушных смесей с добавками в ДВС/ Р у с а к о в М.М. и др.// Вестн. СГАУ. Сер.: Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей. Вып. 2; Самар. гос. аэрокосм. ун-т, Самара, 1998. – С.144 – 148.
3. К о л ч и н А.И., Д е м и д о в В.П. Расчет автомобильных и тракторных двигателей. – М.: Высшая школа, 1980. – 400 с.

УДК 621.45.015.2; 629.7.036.5.015.3

ИМПУЛЬСНЫЕ НАГРУЗКИ НА ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ПРОЦЕССА В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ

Рудницкий А.М.

АО СНТК им. Н.Д. Кузнецова, г. Самара

Отработка запуска высоконапряженных камер сгорания (ВНКС) показала, что процесс воспламенения топлива представляет собой сложное явление, при неудовлетворительном протекании которого может повредиться конструкция этого устройства, [1].

Из литературных данных о процессе воспламенения топлива в камере сгорания, [1] известно, что относительное увеличение давления при зажигании ($P_{k_{\max}} / P_{k_c}$) прямо пропорционально задержке воспламенения τ_b , соотношению между пусковым \bar{G} и номинальным G расходами топлива и обратно пропорционально времени пребывания топлива в камере сгорания τ . Анализ экспериментальных данных по этому процессу в ВНКС показал, что эти представления не отражают полностью исследуемое явление. Существующие формулы максимально развиваемого "пика" ("хлопка") давления, [2, 3]:

$$\frac{P_{\max}}{P_{KC}} = \frac{\tau_B \cdot \bar{G}}{\tau_B \cdot G} \quad (1)$$

$$P_{\max} = \dot{m} \cdot \tau_B \cdot \frac{RT}{\dot{\mu} \cdot V_{KC}} \quad (2)$$

где \dot{m} - скорость газа в камере сгорания, м/с; $\dot{\mu}$ - средний молекулярный вес продуктов сгорания, г; V_{kc} - объем камеры сгорания, м³;

не позволяют, к сожалению, производить оценочный расчет действительных импульсов давления при запуске ВНКС: A_B - высокочастотного импульса давления, кгс/см²; A_{gB} - высокочастотного импульса вибропегрузок, м/с². Это связано с тем, что значения P_{\max} и P_{kc} в формулах (1) и (2) представляют собой возможные значения общего и итогового уровня давления в камере в пусковой период и на основном режиме - стационарном. Обработка экспериментальных данных по процессу воспламенения топлива в натуральных ВНКС выявила, что на переходном режиме запуска двигателя не обнаруживается взаимосвязи между расходом горючего через ВНКС до τ_0 и величиной "пика" давления в момент зажигания, см. рис. 1. По оси абсцисс рис. 1 отложены значения A_B мгновенные величины импульсов давления в момент зажигания, а по оси ординат относительный расход горючего \bar{G}_r на этом времени.

Под термином "пик" давления будем понимать высокочастотный импульс давления в момент зажигания, который регистрируется только высокочастотными датчиками, а не статическими, [1].

Эксперименты позволили выявить зависимость A_B (при прочих равных условиях) в основном от температурных факторов, [1]. Часто значе-

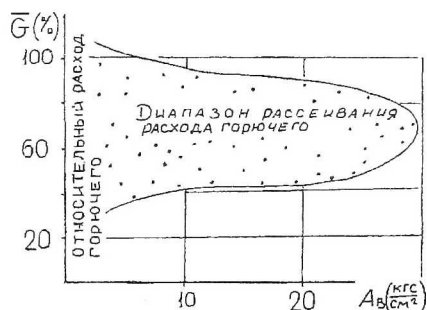


Рис. 1. Импульсы давления A_B в ВНКС на режиме запуска при различных расходах горючего

топлива в их продукты сгорания, носящее локальный характер, регистрируется лишь высокочастотными датчиками пульсаций или вибраций, а не статическими системами P_{max} - не фиксируется, как это следует из формулы (1), [2].

ния A_B (Ag_e) превосходят в десятки раз значения пускового внутрикамерного давления, рис. 2. Это объясняется тем, что общее давление в ВНКС определяется лишь расходом топлива через нее, который весьма мал на режиме запуска, рис. 1, рис. 2. Воспламенение порции топлива при запуске происходит мгновенно, в течение $10^{-3} \dots 10^{-4}$ с и это превращение компонентов

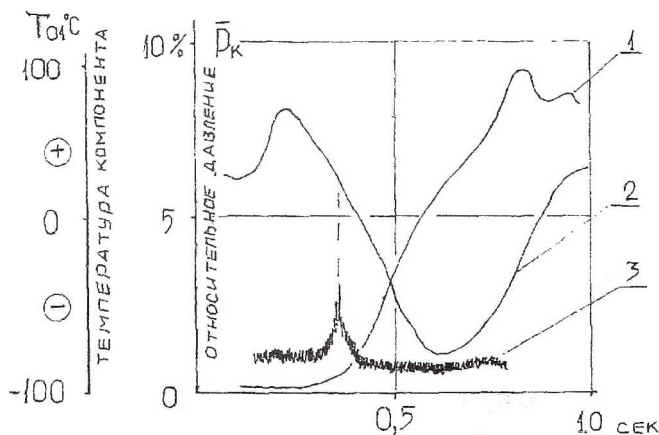


Рис. 2. Изменение параметров P , T , A_B на запуске ВНКС

Всесторонний анализ дефектов форсуночных элементов ВНКС позволил выявить существенную взаимосвязь между деформацией их конструкции и характером протекания процесса воспламенения топлива, [1]. В то же время деформация конструкции отмечалась как при повышенных импульсах A_B (A_{gB}), так и в условиях плавного протекания зажигания, см. рис. 3. Оказалось, что не всегда дефект форсунок связан с вели-

чиной A_B . Кроме того удалось выявить, что существует разновидность этих импульсов. Было выдвинуто предположение, что деформация форсунок связана не с величиной A_B , а с местом его возникновения, с местом локальной детонации порции топлива, что было затем подтверждено экспериментально, [1]. При подрыве малых детонаторов (5.0...15.0г) внутри объема ВНКС или на срезе огневого днища форсуночной головки деформация форсунок не происходила. Когда же детонаторы подрывали внутри форсунок, всегда при этом отмечалась их деформация, коробление, см. рис. 3.

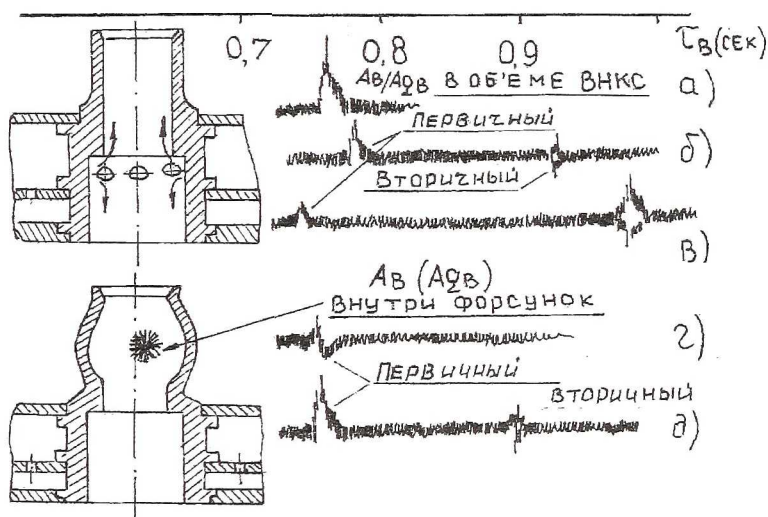


Рис. 3. Классификация импульсов давления (A_B , A_{QB}) на переходных режимах:

а, б, в) - A_B (A_{QB}) - в объеме камеры (неопасны);

г, д) - A_B - внутри смесительных элементов - способствуют их деформации.

С учетом массовых экспериментов и результатов их анализа, изучения предложена соответствующая классификация высокочастотных импульсов давления при запуске ВНКС.

Разновидности этих "пиков" давления A_B (A_{QB}) показаны на рис.3.

Деформация конструкции ВНКС при такой классификации ВНКС зависит не от величины A_B , а лишь от места детонации той или иной порции топлива, находящейся в границах предела воспламенения, а так-

же от причины проникновения одного из его компонентов в полость другого в условиях высокотемпературного режима.

Первичные и вторичные “пики” A_B (A_{gB}) (рис. 3) внутри форсунок и дефект последних являются чаще всего следствием нарушения стабильности циклограммы запуска, приводящим к кратковременному расхождению в напорах окислителя и горючего, что и способствует прохождению одного из них в тракт другого с последующим импульсным стиранием в небольшом объеме форсунки, вызывая ее деформацию, нарушение герметичности и пр.

Этот вывод иллюстрируют данные, представленные на рис. 4: видно, что дефект конструкции отмечается и на пониженных значениях величины A_{gB}/A_B .

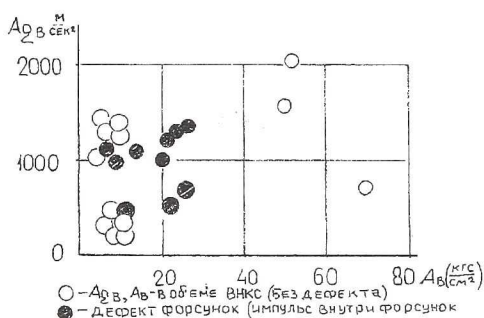


Рис. 4. Взаимосвязь A_B (A_{QB}) с местом возникновения и дефектом конструкции

пироисточников в центре объема КС, когда продувочный, предпусковой газ изолирует их пламя от стенок ВНКС и от топливных струй. Исследование процесса воспламенения в условиях переходных режимов ВНКС позволило определить основные действующие факторы, влияющие на величину A_{gB}/A_B , т. к. желательно, чтобы их фактическая величина была минимальной в реальных условиях эксплуатации изделия. На рис. 5 показаны сочетания температурных параметров (T_r, T_K, T_{01}, T_{02}) и значения импульсных нагрузок A_B .

На рис. 6 приводится изменение пусковой температуры окислительного газа, которое показывает, что при высоких значениях T_{01} ($<< 500^\circ\text{C}$) повышенные величины A_B отсутствуют, [1, 4]. Это послужило поводом для разработки высокоэффективного способа зажигания, основанного на

Дополнительно было выявлено, что величина A_{gB}/A_B в большей мере зависит и от расположения источника зажигания, а не только от его мощности. Было установлено, что при расположении трех пиростеблей по периферии огневого днища ВНКС происходит более эффективное зажигание, чем при наличии девяти

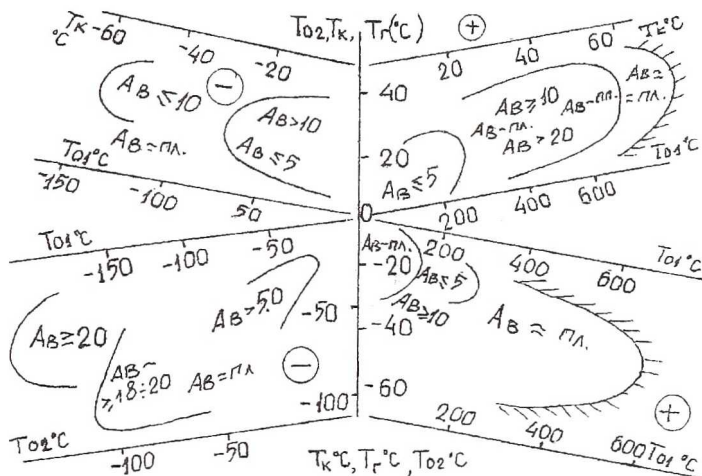
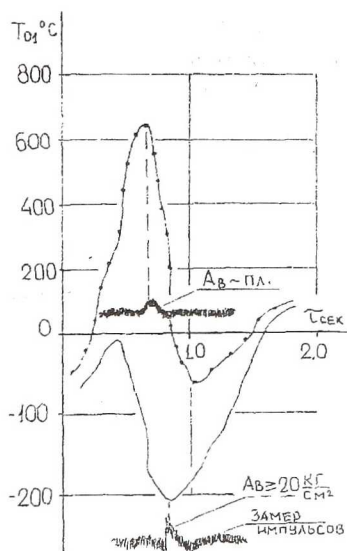


Рис. 5. Влияние на величину A_B совместного действия температурных факторов: T_G , T_K , T_{01} , T_{02} и их взаимного сочетания

Рис. 6. Величина A_B в зависимости от уровня температуры пускового компонента

подаче в ВНКС к моменту зажигания высокотемпературной порции окислительного газа, [4]. Из существующих теоретических представлений по исследуемой теме известно, что процесс зажигания определяется сложной взаимной зависимостью ряда параметров, [3]: T_B - температуры воспламенения; τ_B времени задержки; Q_B - теплоты воспламенения; c_p - теплоемкости топлива; ρ - плотности; λ - коэффициента теплопроводности и мн. др., что в общем виде записывается уравнением:



$$Q_B = (\lambda \cdot C_p \cdot \rho)^{1/2} \sum_{i=0}^s \frac{\Gamma(k+1)}{\Gamma(k+1/2)} \cdot Bi \cdot \tau_B^{(k+1/2)}, \quad (3)$$

где B_K - постоянный коэффициент; k - показатель адиабаты; Γ - гамма функция. При этом:

$$X_B = \frac{\tau_B}{\omega_B} = \frac{\tau_B \cdot q_s \cdot T_B}{Q_B}, \quad (4)$$

$$Y_B = \frac{\sqrt{\tilde{\tau}_B}}{\Theta_I} = \left(\frac{\tau_B}{\lambda \cdot C_p \cdot \rho} \right)^{1/2} \cdot \frac{q_s \cdot \tau_B}{T_B - T_I} \quad (5),$$

где ω_B - безразмерный запас тепла; Θ - безразмерная температура.

Безразмерные комплексы X_B и Y_B дают связь между основными характеристиками воспламенения, т. к. содержат перечисленные выше функциональные параметры, [3]. Однако, практические проблемы, возникающие при отработке реального процесса в ВНКС, не дают возможности пользоваться этими методами расчета, они просто неприменимы. Но использование методов математической статистики позволило более просто, полно и эффективно, вполне достоверно проанализировать огромный статический материал по переходным режимам ВНКС, [1]. Степень влияния определяющего фактора оценивалась отношением факториальной дисперсии Комплекса, по которому производилась группировка на результативный признак. Были таким образом проанализированы следующие факториальные признаки: температура окислительного газа T_{O1} на времени τ_B , температура продувочного газа $T_{ПР.Г}$, температура окружающей Среды $T_{ОКР}$, (T_H), температура окислителя до запуска T_{O2} , температура конструкции T_K , время захолаживания окислителя τ_{CT} , давление горючего $\Delta P_{Г.}$, время срабатывания клапана $\tau_{КЛ.}$, давление продувочного газа $P_{ПР.}$, время задержки воспламенения $\Delta \tau_B$.

Этот анализ дал следующую взаимосвязь влияющих факторов, см. рис. 7, 8, и позволил получить следующие функциональные зависимости (температура в °C):

для зажигания в ВНКС типа A_1 :

$$A_{Q_B}^{A_1} = 336 - 2.5T_{O1} - 5.7T_{\Gamma} - 3T_K - 1.9T_{O2} + 1.6T_{ПР.Г}; \quad (6)$$

- для зажигания в ВНКС типа A_2 :

$$A_{Q_B}^{A_2} = 178.5 + 0.5T_{O1} - 1.04T_K; \quad (7)$$

- для ВНКС на самовоспламеняющемся топливе - тип A_3 :

$$A_{Q_B}^{A_3} = 296T_{\Gamma} + 157\tau_{CT} + 35.1T_{O1} - 88403 \quad (8)$$

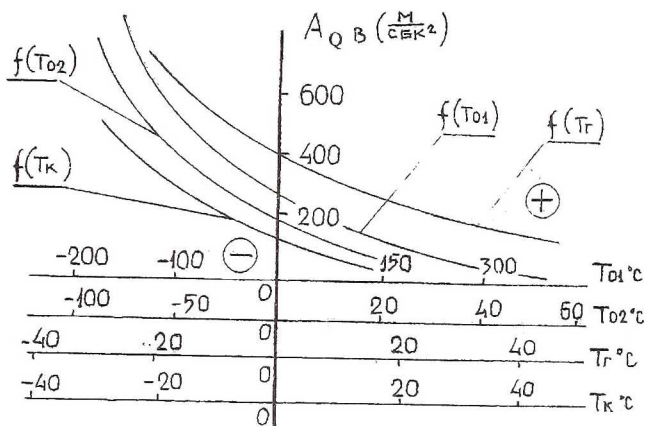


Рис. 7. Функциональные зависимости: $A_{QB} = f(T_{O1}, T_{O2}, T_K, T_T)$

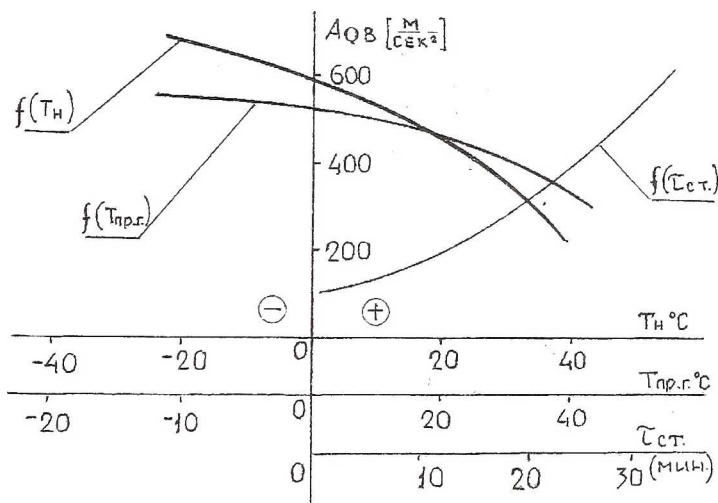


Рис. 8. Функциональные зависимости: $A_{QB} = f(T_H, T_{ПР.Г}, \tau_{ПЛОДГ})$

Отметим, что показания высокочастотных датчиков пульсаций и вибраций в момент зажигания (воспламенения) нестабильны, т. к. импульсы A_B (A_{QB}) возникают в разных местах камеры относительно расположения этих датчиков и погрешность расчетных значений по сравнению с замерами может колебаться от 10% до 70%, а при $T_{O1} > 473K$ такая

погрешность может возрастать в 1.5...3 раза в сторону занижения величин A_B/A_{QB} .

На основе этих данных выявилось, что погрешность в измерении импульсных виброперегрузок не приводит к существенной ошибке прогнозирования, т. к. при температуре $T_{01} > 473\text{K}$ воспламенение топлива происходит всегда плавно, без повышенного уровня A_B/A_{QB} .

Аналогичные быстропеременные процессы протекают и на переходных режимах отключения ВНКС: та же будет классификация импульсов давления и те же возникают дефекты материальной части. Только функциональные зависимости по величинам A_B/A_{QB} будут несколько видоизменены.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рудницкий А. М. Разработка высокоэффективных компонентов топлива. Диссертация. -Куйбышев, 1975, с. 39...62.
2. Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей/ Васильев А. П., Кудрявцев В. М. и др. -М.: Машиностроение, 1967. -С.261-267.
3. Современное состояние тепловой теории зажигания / Мержанов А. П. и др.- М.: Изд-во ФИХФ АН СССР, 1970. -С.5-37.
4. Рудницкий А. М.. Способ высокотемпературного запуска. Спец. тема, ав. св. 61711, 1971.

УДК 621.438.577.4

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ФРОНТОВОГО УСТРОЙСТВА КАМЕРЫ СГОРАНИЯ НА КОНЦЕНТРАЦИЮ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ В ПРОДУКТАХ СГОРАНИЯ

Рыжов А.А., Гребенюк Г.П., Головкин Ю.В.

*Федеральное государственное унитарное предприятие
"НПП «Мотор»", г. Уфа*

Практическая реализация низкоэмиссионного сжигания топлива в камерах газотурбинных установок (ГТУ) является сложной задачей. Это подтверждается тем фактом, что при конвертировании авиационных двигателей для наземных установок с серийным исполнением узла каме-