

УДК 539.196.6

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СВЕРХЗВУКОВОГО ГОРЕНИЯ ВОДОРОДА В ПРОТОЧНОМ ТРАКТЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ПОТОК ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2011 г.

Л.В. Безгин, А.М. Старик, Н.С. Титова

Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, Москва

leon-alp@mail.ru

Поступила в редакцию 24.08.2011

На основе численного анализа показана возможность значительного сокращения длины задержки воспламенения и увеличения эффективности энерговыделения в камере сгорания (КС) модельного высокоскоростного воздушно-реактивного двигателя (ВРД) посредством локального воздействия на поток лазерного излучения с длиной волны 193.3 или 762 нм. Показано, что распределение параметров потока во входном сечении КС существенно неравномерное по высоте канала, поэтому перераспределение расхода водорода через пилоны при сохранении суммарного расхода позволяет существенно увеличить полноту сгорания в проточном тракте модельного двигателя. При совместном использовании этих двух способов интенсификации горения удалось достичь более чем трехкратного роста полноты сгорания по сравнению с равномерным расходом водорода и при отсутствии лазерного излучения.

Ключевые слова: сверхзвуковое горение, лазерное излучение, возбуждение молекул, фотодиссоциация, воспламенение, эффективность горения.

Задача сокращения длины задержки воспламенения и повышения эффективности сверхзвукового горения водорода является весьма актуальной применительно к ВРД для высокоскоростных летательных аппаратов (ЛА). Воздействие на поток лазерного излучения с длиной волны $\lambda_l = 762$ нм приводит к интенсификации цепных реакций вследствие образования электронно-возбужденных молекул $O_2(a^1\Delta_g)$ и $O_2(b^1\Sigma_g^+)$, а излучения с $\lambda_l = 193.3$ нм – вследствие образования атомов О при фотодиссоциации O_2 .

В ЦИАМ разработаны детальная кинетическая модель для описания воспламенения и горения водорода, включающая 12 реагирующих компонентов: H_2 , Н, H_2O , ОН, HO_2 , H_2O_2 , O_3 , $O_2(X^3\Sigma_g^-)$, $O_2(a^1\Delta_g)$, $O_2(b^1\Sigma_g^+)$, $O(^3P)$, $O(^1D)$ – и инертный N_2 , а также численный метод и программа расчета двумерных и квазитрехмерных течений реагирующего газа при воздействии на него лазерного излучения. Метод расчета основан на численном решении стационарной параболизированной системы уравнений Навье–Стокса для многокомпонентной смеси с учетом неравновесных химических реакций и реальных процессов в газах при высоких температурах. Система уравнений замыкалась с помощью однопараметрической модели турбулентности А.Н. Секундова. Численное решение системы уравнений проводилось с использованием явного маршевого (в продольном направлении) метода повышенного

порядка точности типа предиктор–корректор, основанного на стационарном аналоге схемы С.К. Годунова для сверхзвукового потока, с неявной аппроксимацией химических источников членов в уравнениях для концентраций компонентов.

Ранее в [1] исследовалась возможность воспламенения и стабилизации сверхзвукового горения при истечении плоской струи водорода (число Маха 2.5) в полубесконечный воздушный поток (число Маха 3.5) на приемлемых с практической точки зрения расстояниях (~1–2 м) посредством воздействия лазерного излучения с длиной волны $\lambda_l = 762$ нм, приводящего к возбуждению молекул O_2 в состояние $b^1\Sigma_g^+$, на узкий слой воздушного потока (толщина слоя от 0.5 до 4 см), прилегающего к водородной струе. В [2] для этой же задачи рассмотрено также влияние лазерного излучения с $\lambda_l = 193.3$ нм, приводящее к фотодиссоциации молекул O_2 , и исследовано влияние энергии подводимого к потоку лазерного излучения, размера области воздействия, температуры и давления воздушного потока на длину задержки воспламенения.

На примере модельной схемы ВРД для высокоскоростного ЛА (рис. 1, размеры даны в мм) при числе Маха полета 12 исследовалось влияние лазерного излучения с длиной волны $\lambda_l = 762$ нм или 193.3 нм на длину задержки воспламенения и полноту сгорания в проточном тракте двигателя.

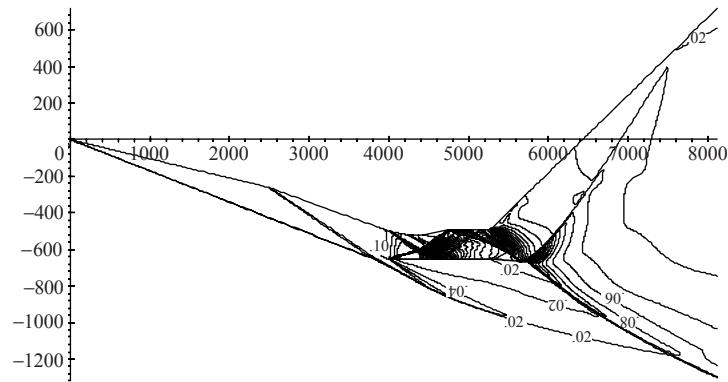


Рис. 1. Модельный ЛА, поле давления

Тангенциальный вдув водорода осуществлялся через систему из 7 пилонов, установленных в КС. Расчет проводился в квазитрехмерном приближении, т.е. в боковом направлении учитывалось только изменение размера проточного тракта. Полнота сгорания по выделенной энергии $\eta_1 = Q_1/Q_0$ определялась как отношение химической энергии Q_1 , выделившейся к данному сечению, и максимальной энергии Q_0 , которая может выделиться, если происходит только одна глобальная реакция $2H_2 + O_2 = 2H_2O$.

Результаты для равномерного расхода водорода через пилоны представлены на рис. 2 в левой колонке в виде полей массовых концентраций воды. Интересно отметить, что в случае отсутствия лазерного излучения (рис. 2а) горение начинается вблизи верхней образующей КС на некотором расстоянии за скачком уплотнения, возникающим от излома верхней образующей КС.

На рис. 2б, в черным прямоугольником, расположенным вблизи нижнего пилона, обозначена зона воздействия лазерного излучения толщиной 6 мм. Удельная энергия, подводимая к воздуху, $E_s = 0.2$ эВ/(молекула O_2).

В результате удалось осуществить воспламенение и диффузионное горение в нижней части КС, при этом в верхней части КС горение по-прежнему начинается за скачком уплотнения. При этом излучение с длиной волны $\lambda_l = 193.3$ нм дает несколько больший эффект, чем излучение с $\lambda_l = 762$ нм, так как приводит к более раннему воспламенению водородо-воздушной смеси, большему размеру зоны горения и к более высоким значениям полноты сгорания η_1 (рост на 141%) (см. черные кривые на рис. 3).

Скачок обечайки пересекает систему пилонов в КС вблизи центрального пилона (см. рис. 1), в верхней части КС наблюдается избыток

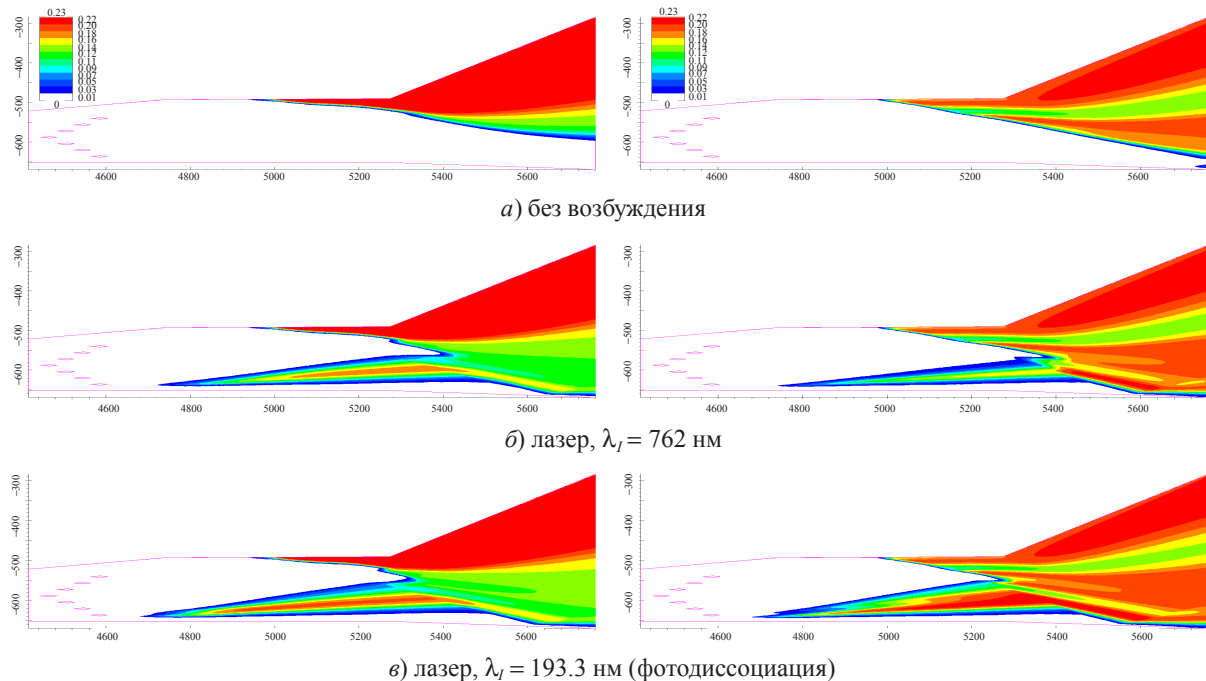


Рис. 2. Поля массовой концентрации H_2O

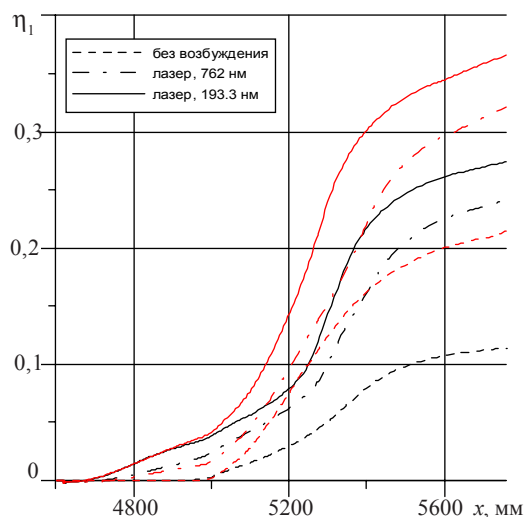


Рис. 3

водорода и недостаток кислорода, в нижней части КС ситуация противоположная. В результате перераспределения вдува водорода через пилоны (правая колонка рис. 2) η_1 возросла на 89% при отсутствии лазерного излучения, а при дополнительном воздействии лазерного излучения – на 221% (см. красные кривые на рис. 3).

В работе принимал активное участие В.И. Копченков.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант №10-01-00809.

Список литературы

1. Starik A.M., Titova N.S., Bezgin L.V., Kopchenov V.I. The promotion of ignition in a supersonic H₂-air mixing layer by laser-induced excitation of O₂ molecules: Numerical study // *Combustion and Flame*. 2009. V. 156, No 8. P. 1641–1652.
2. Bezgin L.V., Kopchenov V.I., Starik A.M., Titova N.S. Numerical analyses of hydrogen/air mixture ignition and combustion in supersonic flow by means of dissociation and excitation of O₂ molecules by laser radiation // *Aero-engines of XXI century: III Int. Scientific and Technical Conf. Moscow*, 30.11.–03.12. 2010.

ENHANCING THE EFFICIENCY OF SUPERSONIC COMBUSTION OF HYDROGEN-AIR IN A DUCT BY LASER RADIATION OF THE FLOW

L.V. Bezgin, A.M. Starik, N.S. Titova

Based on the numerical analysis, it is shown that local exposure of the flow to laser radiation with the wavelengths of 193.3 or 762 nm can considerably reduce the ignition delay length and increase the energy release efficiency in the combustion chamber of a modeling high-speed air-breathing engine. The airflow parameters in the combustion chamber entrance section are essentially non-uniform in the transversal direction, therefore redistribution of hydrogen injection through the struts at the same total hydrogen flow rate makes it possible to significantly increase the combustion completeness in the modeling engine duct. Using the combination of the two above ways of intensifying the combustion, it is possible to increase the combustion completeness by more than 3 times in comparison with the uniform hydrogen injection and the absence of laser radiation.

Keywords: supersonic combustion, laser radiation, excitation of molecules, photodissociation, ignition, efficiency of combustion.