

УДК 621.43.056+519.6

Д. А. ДОЛМАТОВ, А. В. КУКУРУДЗА, М. ХАДЖИВАНД, К. В. ФЕСЕНКО

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина***ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ БЕДНЫХ ГЕТЕРОГЕННЫХ ПЛАМЕН  
С РАЗЛИЧНОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ**

*Рассмотрены проблемы смешения и взаимодействия керосино-воздушных пламен с различной температурой горения и коэффициентом избытка воздуха. Изучен процесс взаимной стимуляции и ингибирования пламен при смешении наружных участков факелов с существенно различающимися концентрациями остаточных радикалов. Получены данные о влиянии частоты пульсации стимулирующего потока и химического состава зоны взаимодействия на температуру, скорость горения, содержание атомарного кислорода и амплитуду колебаний температуры при горении капель с начальным диаметром от 10 до 25 мкм.*

**Ключевые слова:** смешение потоков, молярная доля, алкильный радикал, частота стимуляции, амплитуда колебаний, скорость горения.

**Введение и постановка задачи**

Проблемы взаимодействия реагирующих потоков при гетерогенном горении в настоящее время изучены сравнительно слабо из-за малой практической значимости для традиционных камер сгорания как ГТУ, так и ДВС. Вместе с тем существуют предпосылки к развитию конструкций камер сгорания, использующих существенно разнесенные форсунки с асимметрично ориентированными конусами распыления [1]. Это обусловлено ужесточением требований к экологическим показателям выхлопа двигателей, сопровождаемых необходимостью увеличения эффективности горения и поддержанием достаточно высоких температур на выходе из КС. Бедные пламена в большинстве случаев обладают хорошими показателями эмиссии  $\text{NO}_x$ , однако при этом возникает проблема обеспечения высокой температуры на входе в турбину.

Использование симметрично расположенных форсунок с единым сечением распыления топлива является достаточно хорошо изученным методом обогащения находящихся в промежутке между каскадами форсунок участков пламени, однако может приводить к образованию чрезмерно обогащенных зон с высоким производством оксидов азота. Кроме того, такой способ приводит к существенному увеличению расхода топлива и, как следствие, к ухудшению экономических показателей двигателя в целом. Применение впрыска водяного пара [2], несмотря на высокую эффективность подавления генерации  $\text{NO}_x$  по обоим основным механизмам, в ближайшей перспективе маловероятно для авиаци-

онных двигателей. Электрохимическая стимуляция пламени [3] обладает огромным потенциалом как с точки зрения повышения управляемости процесса горения, так и по причине эффективности для повышения температуры, однако в настоящее время находится на стадии разработки.

Большой интерес представляет нестационарная стимуляция основного факела пламени дополнительной форсункой пульсирующего впрыска, обеспечивающей периодическое увеличение концентрации топлива в определенных зонах горения и вместе с тем не приводящей к возникновению стационарных богатых участков. Данный метод достаточно легко применим в большинстве камер сгорания ГТУ, однако мало изучен и требует большой подготовительной работы по выявлению закономерностей взаимодействия реагирующих потоков.

В настоящей работе рассматривается взаимодействие основного потока, формируемого одиночной форсункой с коническим распылением керосина, и стимулирующего потока с линейным впрыском топлива, ориентированным под некоторым углом к первоначальному вектору капель из основной форсунки таким образом, что взаимодействие потоков происходит на определенном удалении от сечений распыления, определяемом на основании прогнозного химического состава и температуры среды в основном потоке. Под сечением взаимодействия потоков в данном случае понимается сечение, в котором происходит пересечение условных траекторий движения капель из основной и вспомогательной форсунок. Варьированию подвергается начальный размер капель, угол между векторами

распыления, температура и химический состав основного потока в сечении взаимодействия, а также частота впрыска стимулирующих зарядов топлива. Влияние стенок жаровой трубы и вторичного воздуха не учитывается, т.е. предполагается достаточная удаленность моделируемой зоны от твердых границ.

Для определения параметров в зоне взаимодействия в настоящей работе используются результаты численного моделирования и натуральных экспериментов по изучению керосиновых пламен и горению каплей топлива [4 - 6]. Математическая модель, описывающая процессы взаимодействия, основана на уравнениях химической кинетики и нестационарного теплообмена [7, 8]. Фильтрация генерального баланса реакций осуществляется на основании решения полной системы уравнений коэффициентов чувствительности [7].

### Влияние частоты стимулирующего впрыска на параметры пламени

Одним из основных требований к периодической стимуляции, очевидно, является необходимость соблюдать достаточно большой интервал между впрысками дополнительного топлива для недопущения перехода процесса в квазистационарный и вместе с тем – сравнительно малый для того, чтобы периоды стимулированного горения составляли большую часть процесса в целом. В качестве наиболее простого и удобного для моделирования случая выбрана стимуляция с равными промежутками работы и бездействия стимулирующей форсунки. Исследуемые частоты стимуляции составляют от 20 до 100 Гц. В данном разделе, как и в последующем, моделируется горение каплей керосина с различным начальным диаметром – 10, 15 и 25 мкм. Стимулируемая зона горения выбрана (с учетом траекторий движения каплей из основной и вспомогательной форсунок) таким образом, чтобы температура в точке пересечения траекторных линий составляла  $1700\text{K} \pm 60\text{K}$  (с учетом того, что стимулирующий поток обладает конечной толщиной и, строго говоря, вступает во взаимодействие с основным потоком при различных параметрах последнего) и вместе с тем могла обладать, при различных условиях распыления и организации горения основного потока, варьируемым химическим составом с точки зрения остаточных углеводородных радикалов и контрольных веществ. Соотношение расхода топлива через основную и стимулирующую форсунки составляет 5:1, разница средних температур пламен – на 50 К выше у стимулирующего. Результаты моделирования представлены на рис. 1–3. Кроме того, было проведено моделирование процесса горения на некотором удалении от сечения взаи-

модействия с целью исследования затухания пульсаций полей параметров по мере удаления от сечения смешения; результаты представлены на рис. 4 и 5.

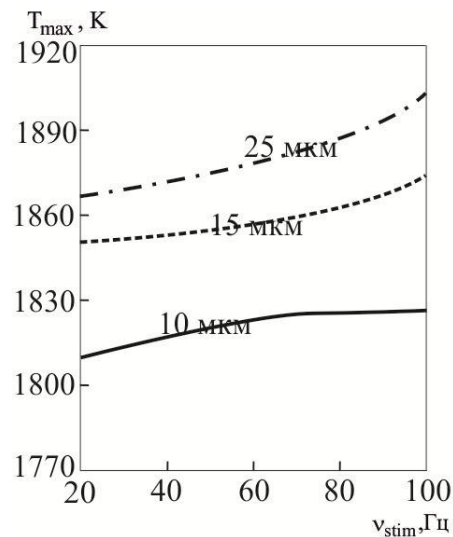


Рис. 1. Максимальная температура

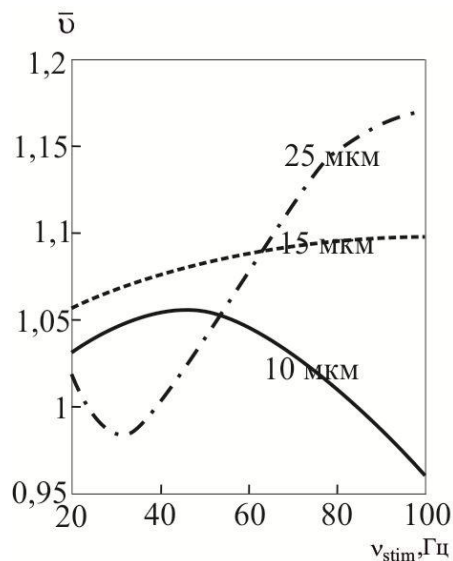


Рис. 2. Относительная скорость горения

Как нетрудно видеть из рис. 1, увеличение частоты пульсаций стимулирующего потока вне зависимости от начального диаметра капли ведет к повышению максимальной температуры. Вместе с тем скорость горения как функция частоты стимуляции для различных начальных диаметров весьма существенно различается (рис. 2), и для капель диаметром 25 мкм существует локальный минимум  $\bar{v} = 0,982$ , т.е. скорость горения несколько снижается по сравнению с нестимулированным пламенем, в то время как для капель диаметром 10 мкм наблюдается локальный максимум при значениях  $v_{stim}$  в диапазоне от 30 до

50 Гц, с последующим снижением скорости горения до значений ниже нестимулированных. Данный эффект свидетельствует о существенных различиях в химических механизмах горения капель различного диаметра при различных стимуляционных частотах, что представляет собой одну из важнейших задач дальнейшего исследования.

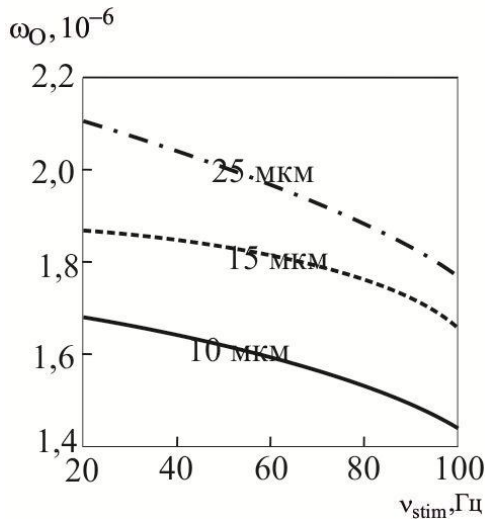


Рис. 3. Доля атомарного кислорода

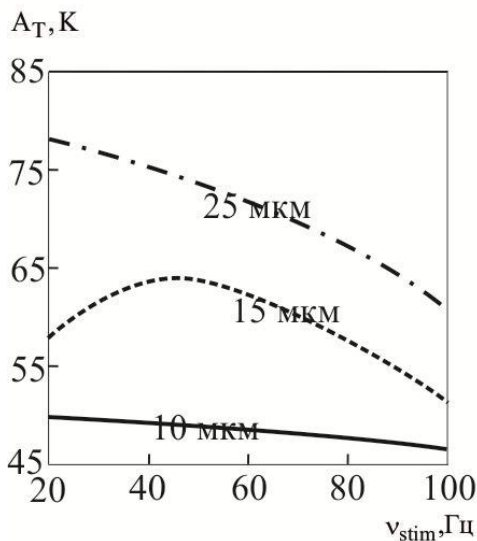


Рис. 4. Амплитуда колебаний температуры,  $l = 35$  мм

Доли атомарного кислорода (рис. 3), в целом низкие для столь бедных пламен, при стимуляции растут на  $0,45 - 1,09 \cdot 10^{-6}$  с одинаковой для всех начальных диаметров тенденцией к уменьшению с ростом  $\nu_{stim}$ . Немаловажными являются представленные на рис. 4 – 5 данные об амплитуде колебаний температуры и их затухании по мере удаления от зоны стимуляции. Нетрудно видеть, что наиболее сложный характер зависимости проявляют пламена с началь-

ным диаметром капель 15 мкм (рис. 4). Во всех остальных случаях наблюдается монотонное уменьшение амплитуды по мере роста частоты стимуляций, при этом в сечении на расстоянии 100 мм от зоны стимуляции при  $\nu_{stim}$  свыше 60 Гц температурная амплитуда сопоставима с масштабом неравномерности поля температур при стационарном горении.

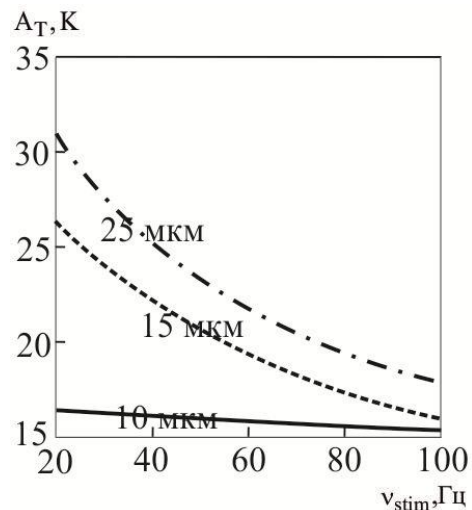


Рис. 5. Амплитуда колебаний температуры,  $l = 100$  мм

### Влияние химического состава стимулируемой зоны

Помимо стимуляционной частоты и размера капель, на процесс горения существенное влияние, очевидно, оказывает состав среды в зоне взаимодействия. В целом химический профиль среды при рассматриваемых температурах может варьироваться в очень широких пределах, а, следовательно, обладать различной восприимчивостью к стимуляции при смешении потоков. На данном этапе исследований целесообразно рассмотреть лишь наиболее общие взаимосвязи характеристик смешения пламен, в частности, влияние содержания остаточных углеводородных радикалов на основные параметры горения. В связи с этим в зоне взаимодействия задавались остаточные доли углеводородных радикалов (только алкильных в диапазоне от СН до  $C_{10}H_{21}$ , присутствие более тяжелых нерасщепленных углеводородов в соответствующей зоне маловероятно) в процентном отношении к начальному по углеродным числам и без учета частично окисленных соединений вида СНО и др. Частота пульсаций выбрана равной 100 Гц (во избежание моделирования зон экстремумов некоторых параметров процесса, см. рис. 2, 4), диаметры капель совпадают с предыдущим численным экспериментом. Ре-

зультаты моделирования процесса смешения представлены на рис. 6 – 9.

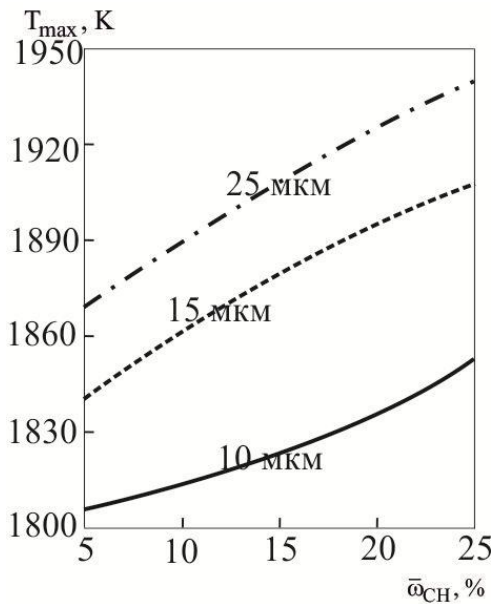


Рис. 6. Максимальная температура пламени

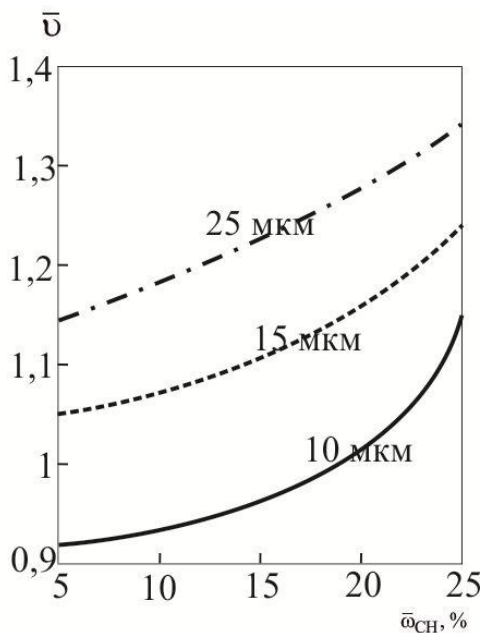


Рис. 7. Относительная скорость горения

Амплитуда колебания температуры в сечении на расстоянии 35 мм по данным расчета очень слабо зависит от содержания остаточных углеводородов, в связи с чем в данном разделе исследований не представлена на графиках.

Температура и скорость горения прогнозируемо растут с увеличением доли СН в зоне взаимодействия (рис. 6, 7). При этом для сравнительно больших (свыше 18%) остаточных долей СН наблюдается прекращение ингибирования пламени, свойственного, со-

гласно расчетам, пламенам с начальным диаметром каплей 10 мкм при высокой частоте пульсации стимулирующего потока (рис. 7).

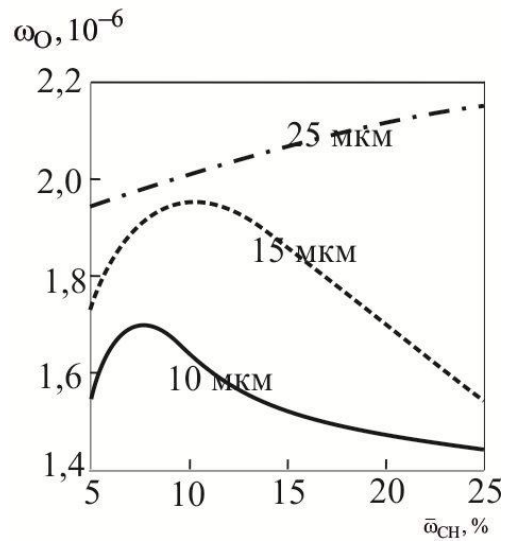


Рис. 8. Доля атомарного кислорода

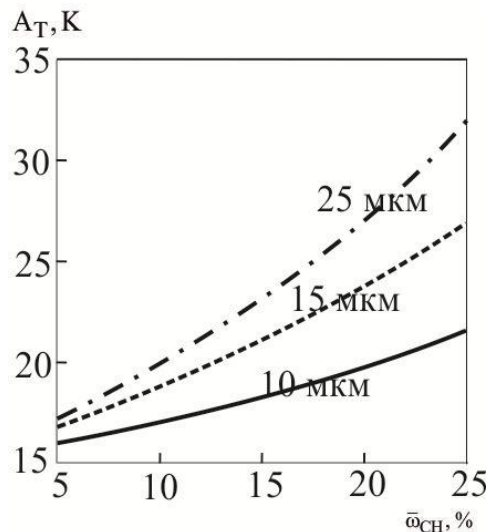


Рис. 9. Амплитуда колебаний температуры,  $l = 100$  мм

Одним из важнейших установленных фактов следует признать наличие максимумов концентрации атомарного кислорода при остаточных долях углеводородов 10 – 15% от начальной концентрации (см. рис. 8). Очевидно, одной из причин такого поведения могут служить конкурирующие реакции, приводящие к превосходству процессов связывания О над процессами его генерации. Алкильные радикалы являются достаточно удобным восстановителем для атомарного кислорода, в связи с чем по мере возрастания их концентрации в смеси скорость реакции образования гидроксидов по механизму отщепления водородного атома может существенно возрастать. В то же время,

наличие максимума свидетельствует о дополнительном производстве  $O$  при определенных условиях в ходе, по-видимому, высокоэнергетических эндотермических реакций, а, следовательно, увеличению вероятности связанной с ним генерации  $NO$ .

Из представленного на рис. 9 графика видно, что при взаимодействии потоков с высоким остаточным содержанием непрореагировавших углеводородных радикалов наблюдаются значительные колебания температуры даже в сравнительно удаленном от зоны взаимодействия сечении. По мере увеличения начального диаметра капель во взаимодействующих потоках увеличивается и амплитуда температурных колебаний, а, следовательно, и дистанция их затухания. Из-за малого количества контрольных сечений на данном этапе затруднительно установить, насколько различно поведение колебаний температуры в более удаленных зонах пламени.

Приоритетным направлением дальнейшего изучения нестационарного взаимодействия бедных пламен следует признать моделирование периодической стимуляции в более широком диапазоне частот пульсаций вспомогательного потока, а также более детальное исследование химической кинетики процесса. Также на основании полученных данных следует провести моделирование генерации вредных веществ при различных условиях пульсации параметров с использованием 3D-моделирования нестационарного реагирующего вязкого течения с высокой детализацией химической кинетики процесса.

## Литература

1. Алемасов, В. Е. Основы теории физико-химических процессов в тепловых двигателях и энергетических установках [Текст] / В. Е. Алемасов, А. Ф. Дрегалин, А. С. Черенков. – М. : "Химия", 2000. – 520 с.
2. Лефевр, А. Процессы в камерах сгорания ГТД [Текст] : пер. с англ. / А. Лефевр. – М. : Мир, 1986. – 566 с.
3. Долматов, Д. А. Регулирование воздушного горения углеводородов разрядами малой длины [Текст] / Д. А. Долматов // Вестник двигателестроения. – 2011. – № 2. – С. 41 – 51.
4. Архипов, В. А. Горение распыленного жидкого топлива в закрученном потоке [Текст] / В. А. Архипов, О. В. Матвиенко, В. Ф. Трофимов // Физика горения и взрыва. – 2005. – № 2. – С. 26–37.
5. Hara, H. The effect of initial diameter of free droplet combustion with spherical flame [Text] / H. Hara, S. Kumagai // Proc. 25<sup>th</sup> Symp. On Combustion. – Pittsburgh, PA, The Combustion Institute, 1994. – P. 423 – 430.
6. Испарение и горение капли углеводородного топлива. Неэмпирическая модель испарения капли с учетом многокомпонентной диффузии [Текст] / С. М. Фролов, В. С. Посвянский, В. Я. Басевич, А. А. Беляев и др. // Химическая физика. – 2004. – Т. 23, № 4. – С. 75 – 83.
7. Варнатц, Ю. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ [Текст] / Ю. Варнатц, У. Маас, Р. Диббл. – М. : ФИЗМАТ-ЛИТ, 2006. – 352 с.
8. Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике [Текст] / В. С. Авдуевский, Ю. И. Данилов, Ю. С. Михеев и др. – М. : Машиностроение, 1975. – 624 с.

Поступила в редакцию 12.06.2014, рассмотрена на редколлегии 16.06.2014

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., проф. каф. ракетно-космических двигателей и энергетических установок летательных аппаратов А. В. Амброжевич, Национальный аэрокосмический ун-т им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков.

### ВЗАЄМОДІЯ БІДНИХ ГЕТЕРОГЕННИХ ПОЛУМ'ІВ З РІЗНОЮ ТЕМПЕРАТУРОЮ

*Д. А. Долматов, А. В. Кукурудза, М. Хадживанд, К. В. Фесенко*

Розглянуто проблеми змішення та взаємодії керосино–повітряних полум'їв з різною температурою горіння та коефіцієнтом надлишку повітря. Вивчено процес взаємної стимуляції та інгібування полум'їв при змішуванні зовнішніх ділянок факелів з суттєво різними концентраціями залишкових радикалів. Отримано дані щодо впливу частоти стимулюючої течії та хімічного складу зони взаємодії на температуру, швидкість горіння, вміст атомарного кисню та амплітуду коливань температури при горінні крапель з початковим діаметром від 10 до 25 мкм.

**Ключові слова:** змішення потоків, молярна доля, алкільний радикал, частота стимуляції, амплітуда коливань, швидкість горіння.

### THE INTERACTION OF POOR FLAMES WITH DIFFERENT TEMPERATURES

*D. A. Dolmatov, A. V. Kukurudza, M. Hajivand, K. V. Fesenko*

The problems of different temperatures and fuel coefficients kerosene – air flames mixing and interaction was studied. The process of flames' mutual stimulation/inhibition during the mixing of outer flame parts with noticeable different hydrocarbon radical concentrations was investigated. There received data about influence of the stimulant flow pulsation frequency and interaction zone chemical profile on the temperature, burning speed, atomic oxygen part and temperature oscillation frequency during combustion of droplets with initial diameters from 10 to 25  $\mu\text{m}$ .

**Key words:** flow mixing, molar part, alkyl radical, stimulation frequency, oscillation amplitude, burning speed.

**Долматов Дмитрій Анатольевич** – канд. техн. наук, доцент кафедри теорії авіаційних двигателів, Національний аерокосмічний університет ім. Н. Е. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна, e-mail: ditrihantelson@yandex.ru.

**Кукурудза Андрей Васильевич** – інженер 1-ої категорії кафедри технології виробництва авіаційних двигателів, Національний аерокосмічний університет ім. Н. Е. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна.

**Хадживанд Масуд** – аспірант кафедри конструкції авіаційних двигателів, Національний аерокосмічний університет ім. Н. Е. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна.

**Фесенко Ксенія Владимировна** – асистент кафедри теорії авіаційних двигателів, Національний аерокосмічний університет ім. Н. Е. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна.