

УДК 621.43.056+519.6

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

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

## РАЗВИТИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ГОРЕНИЯ ПРИ ХИМИЧЕСКОЙ СТИМУЛЯЦИИ БЕДНОГО ПЛАМЕНИ

*Статья посвящена теоретическим основам возникновения и развития нестационарных процессов в бедных пламенах воздушных смесей насыщенных углеводородов со средним углеродным числом при стимуляции пламени химическими методами. Рассмотрены различные способы химической стимуляции, включающие в себя впрыск в зону горения химически активных непредельных соединений и рост концентрации свободных радикалов. При помощи численного моделирования проведена оценка возможности возникновения локальных пульсаций параметров для различных способов и характеристик стимуляции. Предложены пути дальнейшего изучения вопросов генерации нестационарных неударных колебаний пламени и усовершенствования математической модели многокомпонентного горения.*

**Ключевые слова:** скорость реакции, концентрация, перестройка пламени, стимуляция горения, радикал, особая зона, унос продуктов сгорания.

### Принципы и методы химической стимуляции бедных пламен

Стремление к улучшению экологических характеристик тепловых двигателей и других устройств, использующих термическое горение углеводородных топлив в качестве источника энергии, в последние десятилетия привело к расширению областей применения обедненных пламен [1]. До практического внедрения методов прямого управления физико-химической структурой пламени [2], а также без технологического скачка в области жаропрочных сплавов, переход к горению богатых и стехиометрических смесей в основных камерах сгорания маловероятен. Таким образом, все более актуальной проблемой является обеспечение высоких характеристик горения сравнительно низкотемпературных пламен с малым содержанием топлива.

К существенным проблемам организации процессов горения бедных смесей относятся, во-первых, бедный срыв пламени, во-вторых – создание равномерного поля параметров на выходе из зоны активного горения [3, 4]. В настоящее время известен метод стимуляции горения в опасных зонах бедного пламени путем непрерывного либо периодического впрыска в зону первичного горения либо дожигания химически активных веществ [3, 5]. В роли стимуляторов могут выступать различные вещества, как правило – соединения с большей, по сравнению с основным топливом, химической активностью, экзотермически реагирующие с кислородом воздуха в диапазоне рабочих температур зоны горения и обладающие безопасной для данного

диапазона кривой перехода в детонационный режим горения. Достаточно удобными (как с точки зрения безопасности, так и относительно экологической безвредности продуктов сгорания) для применения в роли стимуляторов являются непредельные углеводороды и кислородсодержащие соединения с кратной углерод-углеродной связью [6].

Вместе с тем следует отметить, что теория стимуляции горения как методом впрыска высокоактивных реагентов, так и другими методами [7] нуждается в развитии и формировании эффективного математического аппарата, описывающего физические процессы при скачкообразном увеличении концентрации активных частиц. В частности, наиболее актуальным является вопрос механизма возникновения и развития криптонестационарных эффектов, в том числе вибрационного горения и локального заброса концентраций. Фундаментальным критерием стационарности процесса является равновесие производства, расхода, механического движения и диффузии каждого компонента смеси при равенстве нулю частных производных по времени:

$$\sum v_{ki} + \mu_i^{-1} \frac{\partial(\omega_i \rho C^j)}{\partial x^j} + \frac{\partial}{\partial x^j} \left( D \frac{\partial c_i}{\partial x^j} \right) = 0, \quad (1)$$

где  $v_{ki}$  – скорость  $k$ -той реакции производства  $i$ -го компонента;

$\omega_i$  – массовая доля  $i$ -го компонента;

$\rho$  – плотность среды;

$C^j$  – контравариантные компоненты скорости;

$c_i$  – концентрация  $i$ -го компонента;

$\mu_i$  – киломолярная масса  $i$ -го компонента;  
 $D$  – коэффициент диффузии (с учетом эффекта Соре [1]).

Таким образом, задача обнаружения и прогнозирования развития криптонестационарных и нестационарных режимов горения может быть сведена к исследованию поведения трех основных факторов возникновения и исчезновения компонент – химическим реакциям, диффузии и механическому движению. Аналитическое исследование уравнения (1) затруднительно по причине его неразрешимости в изолированном виде и необходимости решения основной системы уравнений движения реагирующей сплошной среды, что возможно только при помощи соответствующих численных методов. Вместе с тем значительный интерес представляет оценка влияния скачкообразного изменения граничных условий на основные факторы, в частности, моменты изменения характера зависимостей их вклада в баланс производства-расходования. В настоящей работе в качестве объекта исследования выбрано стационарное воздушно-гептановое пламя с топливным коэффициентом в диапазоне от 0,75 до 0,8; внешнее стимулирование представлено а) в виде впрыска в определенном сечении этилен-гексеновой смеси (детерминированная стимуляция) и б) в виде дополнительного объемного производства активных радикалов в сравнительно малой зоне реакционного пространства как результат некоторого внешнего воздействия (обобщенная стимуляция). При исследовании использовались математические модели различного уровня и специализированные программные пакеты.

### Влияние непредельных углеводородов на параметры и механизм горения

В основе используемых математических моделей лежит традиционная система уравнений движения реагирующей сплошной вязкой среды в трехмерной постановке, для моделей низкого уровня преобразуемая к одно- и двумерной форме с соответствующими сокращениями. Реакции производства – расходования компонент выбраны методом расширенной фильтрации генерального баланса горения гептана, этилена и гексена в воздухе; контроль выхода NO не осуществляется.

Рассмотрим вначале влияние инъекции непредельных углеводородов на параметры горения. На рис. 1 представлено изменение температуры вдоль проточной части при различном расходе впрыскиваемого стимулятора по сравнению с базовым режимом горения, на рис. 2 – поведение относительной интегральной скорости горения углеводородов.

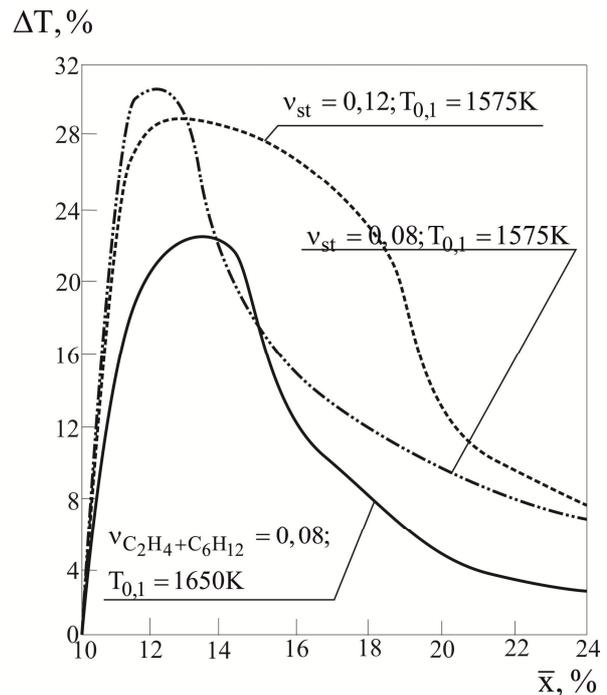


Рис. 1. Рост температуры пламени при впрыске стимуляционного заряда

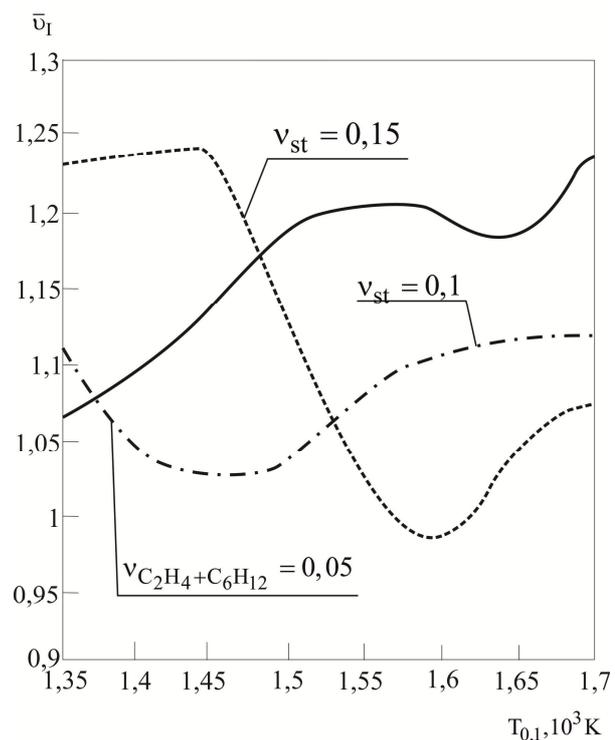


Рис. 2. Скорость горения углеводородов

Как нетрудно увидеть из рис. 2, влияние впрыска стимулятора на скорость горения нелинейно и существенно зависит от температуры и мольной доли непредельных углеводородов. Интересным эффектом является наличие минимума скорости во всем диапазоне исследуемых значений  $v_{st}$ , причем

для максимального значения  $v_{st} = 0,15$  минимальная скорость горения оказывается даже несколько меньше базовой. Данное явление, очевидно, не может быть объяснено традиционными физико-химическими стационарными процессами, поскольку эквивалентный топливный коэффициент в рассматриваемом случае составляет 0,94 и, таким образом, богатое торможение пламени невозможно. С целью изучения процесса и выявления криптонестационарных явлений использовался метод мониторинга мгновенных значений параметров в контрольном сечении при небольшом шаге по времени, при этом использовалась форма записи уравнений движения сплошной среды с нестационарными членами производства энтальпии в химических реакциях и ненулевыми по умолчанию производными параметров по времени [8]. На рисунках 3 - 5 представлено поведение температуры, мольной доли атомарного кислорода и суммарной концентрации не полностью расщепленных углеводородов как функции времени для различных значений  $T_{0,1}$  при  $v_{st} = 0,15$ . Контрольное сечение выбрано на расстоянии  $\Delta \bar{x} = 0,05$  от сечения впрыска стимулирующего заряда; подача этилен-гексеновой смеси – стационарная.

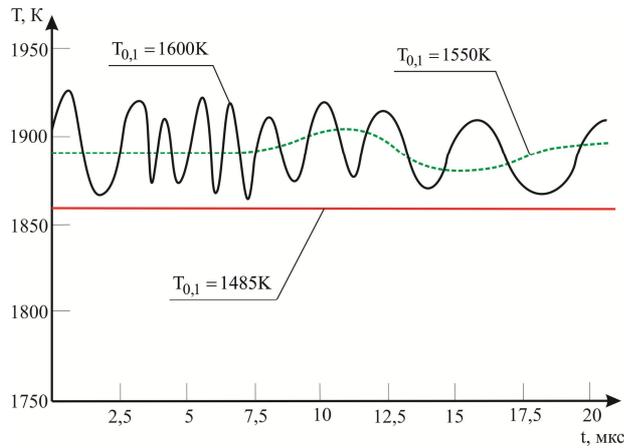


Рис. 3. Температура среды

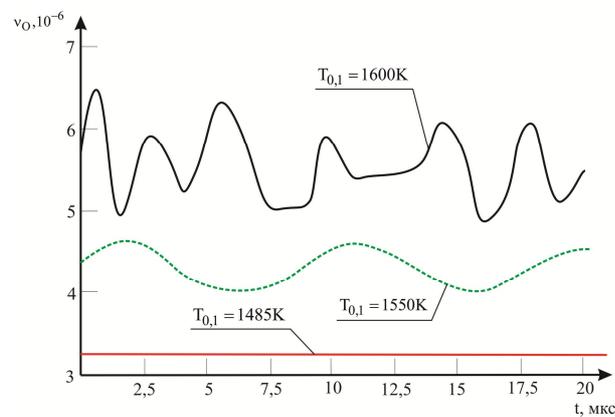


Рис. 4. Доля атомарного кислорода

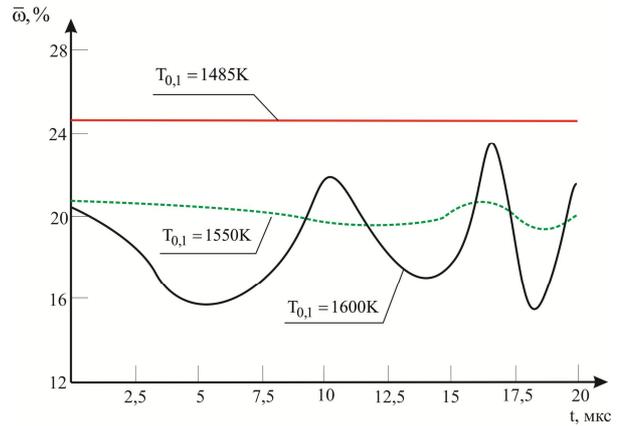


Рис. 5. Доля остаточных углеводородов

Нетрудно видеть, что при низкой базовой температуре зоны впрыска ( $T_{0,1} = 1485K$ ) горение остается стационарным. При повышении температуры, сопровождаемом монотонным снижением прироста интегральной скорости горения (см. рис. 2), процесс также можно считать стационарным – низкоамплитудные колебания температуры и доли остаточных углеводородов с большой периодичностью, скорее всего, следует отнести на счет схемной вычислительной погрешности. Напротив, изменение во времени концентрации атомарного кислорода (рис. 4) носит явно выраженный характер криптонестационарного эффекта и обусловлена, вероятно, изменением баланса производства – расходования при появлении сравнительно большого числа активных неперелетных радикалов, которым свойственна реакция расщепления молекулярного кислорода [6]. Вместе с тем нетрудно увидеть, что данные колебания концентрации O очень слабо влияют на мгновенный calorический выход и не приводят к локальным колебаниям температурного поля или перестройке пламени.

Напротив, при базовой зональной температуре  $T_{0,1} = 1600K$ , примерно соответствующей минимуму интегральной скорости горения (рис. 2), наблюдается развитие высокочастотных колебаний контрольных параметров, причем характер этих колебаний является рассогласованным и, таким образом, обусловлен различными физико-химическими механизмами. Сравнивая характер поведения параметров с криптонестационарными эффектами при горении капли жидкого топлива, представленными на рис. 6, можно отметить принципиально иной вид зависимости параметров от времени, наблюдаемой в случае химической стимуляции. Для стационарного горения жидкого топлива соответствующие нестационарные колебания температуры (рис. 6) напрямую связаны с прохождением через контрольную поверхность границ раздела фаз, в то время как в рассматриваемом случае наблюдается более строгая

периодическая зависимость, связанная с периодичностью изменения знака производства-расходования реагентов в зоне горения.

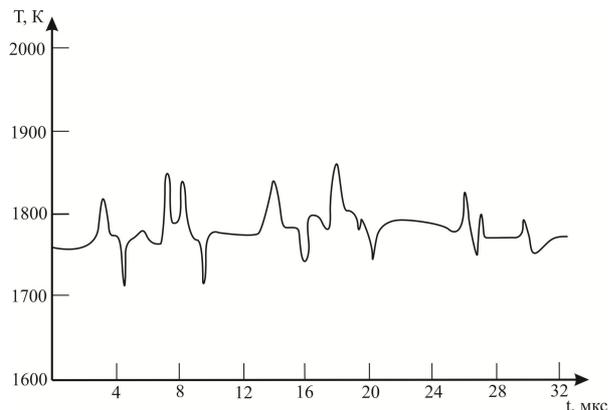


Рис. 6. Криптонестационарные эффекты при горении капель жидкого топлива

Также следует отметить, что пульсации температуры (рис. 3) и остаточной доли углеводородов (рис. 5) имеют выраженный характер установления процесса, т.к. с течением времени частота колебаний линейно изменяется – падает для температуры и растет для остаточной доли. Природа данного эффекта, видимо, связана с кинетическими механизмами горения смеси предельных и непредельных углеводородов при локальных пульсациях концентраций.

Наряду с исследованием детерминированной стимуляции пламени, было проведено математическое моделирование условной химической стимуляции неопределенного вида, приводящей к росту активных свободных радикалов  $\text{OH}$  и  $\text{HO}_2$ ; дополнительное производство означенных частиц моделировалось при помощи объемного источников члена. Данный вид стимуляции, согласно полученным результатам, также приводит к развитию локальной нестационарности, причем в отличие от детерминированной стимуляции пламени впрыском непредельных углеводородов – практически во всем диапазоне базовых температур. Производство дополнительных активных частиц этого типа может быть вызвано, например, воздействием модулированного электрического разряда малой мощности. На рис. 7 представлено поведение температуры при дополнительном производстве  $\text{OH}$  в размере 30% от базового и  $\text{HO}_2$  – 15% от базового; контроль атомарного кислорода и остаточных углеводородов в данном случае не проводился вследствие принудительного изменения кинетической схемы горения.

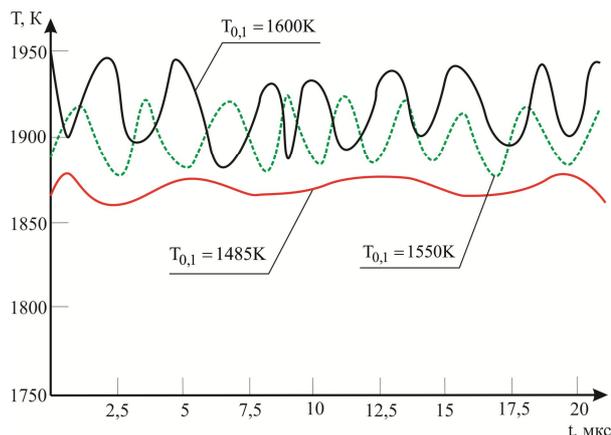


Рис. 7. Температура среды при дополнительном производстве активных радикалов

Заметное увеличение средней зональной температуры, наблюдаемое во всех случаях на рис. 7, относится к повышению химической активности (а, следовательно, и интенсивности преобладающих экзотермических реакций) среды при искусственном увеличении концентрации активных радикалов.

## Выводы

По результатам математического моделирования процессов горения стимулируемых бедных смесей следует отметить избирательную возможность возникновения нестационарного горения при стимуляции методом впрыска непредельных углеводородов и существование безопасных режимов горения. Вместе с тем возникающие при благоприятных условиях локально нестационарные режимы горения имеют тенденцию к эволюции и рассогласованную природу пульсаций различных параметров, что создает возможность для резонансных эффектов и резкого скачка скорости горения, а, следовательно, перестройки фронта пламени. Скачкообразное увеличение концентрации активных гидроксильных и  $\text{HO}_2$ -радикалов в реакционной зоне приводит к развитию криптонестационарных эффектов в большом диапазоне параметров, что обуславливает необходимость исследований возможных механизмов такого скачка. Наряду с генерацией и развитием нестационарных эффектов налицо заметное увеличение температуры среды и скорости горения.

## Литература

1. Варнатц, Ю. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ [Текст] / Ю. Варнатц, У. Маас, Р. Дибл. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 352 с.

2. Долматов, Д.А. Регулирование воздушного горения углеводородов разрядами малой длины [Текст] / Д.А. Долматов // Вестник двигателестроения. – 2011. – №2. – С. 41 – 51.

3. Лефевр, А. Процессы в камерах сгорания ГТД: пер. с англ. [Текст] / А. Лефевр. – М.: Мир, 1986. – 566 с.

4. Fristrom, R.M. Flame structure and processes [Text] / R.M. Fristrom. Oxford/NY, 1995. – 675 p.

5. Абдуллин, А.Л. Моделирование процессов горения и управление экологическими и энергетическими характеристиками тепловых двигателей и энергоустановок: дис. ... д-ра техн. наук: 05.07.05;

защита 12.04.2004; утв. 21.09.2004 / Абдуллин Айрат Лесталевич. – Казань, 2004. – 309 с.

6. LEEDS – Reaction Kinetic Database [Text] / University of Leeds, 2004. – 890 p.

7. Афанасьев, В.В. Управление преддетонационным ускорением пламени в полуоткрытых каналах с помощью электрического разряда [Текст] / В.В. Афанасьев, С.В. Ильин, Н.И. Кидин // Химическая физика. – 2001. – Т. 20, №5. – С. 12–18.

8. Оран, Э. Численное моделирование реагирующих потоков [Текст] / Э. Оран, Дж. Борис. – М.: Мир, 1990. – 660 с.

Поступила в редакцию: 12.12.2012, рассмотрена на редколлегии 26.12.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., проф. каф. «Конструкции авиационных двигателей» Д.Ф. Симбирский, Национальный аэрокосмический ун-т им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков.

#### РОЗВИНЕННЯ НЕСТАЦІОНАРНОГО ГОРІННЯ ПРИ ХІМІЧНІЙ СТИМУЛЯЦІЇ БІДНОГО ПОЛУМ'Я

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

Стаття присвячена теоретичним засадам виникнення і розвинення нестационарних процесів у бідних полум'ях повітряних сумішей насичених вуглеводнів з середнім вуглеводневим числом при стимуляції полум'я хімічними методами. Розглянуто різноманітні способи хімічної стимуляції, до яких належать вприскування в зону горіння хімічно активних ненасичених речовин і зростання концентрації вільних радикалів. За допомогою числового моделювання проведено оцінку можливості виникнення локальних пульсацій параметрів для різних засобів та характеристик стимуляції. Запропоновано шляхи подальшого вивчення питань генерації нестационарних неударних коливань полум'я та вдосконалення математичної моделі багатокомпонентного горіння.

**Ключові слова:** швидкість реакції, концентрація, перебудова полум'я, стимуляція горіння, радикал, винос продуктів згоряння.

#### TRANSIENT COMBUSTION EXTENSION DURING CHEMICAL STIMULATION OF POOR FLAMES

*D.A. Dolmatov, A.V. Kukurudza, M. Hajiwand*

The article contains theoretical basics of generation and extension of the transient processes in poor air flames of saturated hydrocarbons with middle carbon number during flame stimulation by chemical methods. There were examined different chemical stimulation methods which include injection of active unsaturated components into combustion zone and free radical concentration increasing. By assistance of numerical investigate methods, there was conducted the estimate of local pulsation possibilities for different stimulation methods and parameters. Ways for further flame research in the area of transient non-shock oscillations and multicomponent combustion mathematical model improvement have been suggested.

**Key words:** reaction velocity, concentration, flame rebuilding, combustion stimulation, radical, combustion products outflow.

**Долматов Дмитрий Анатольевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры теории авиационных двигателей, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: ditrihantelson@yandex.ru.

**Кукурудза Андрей Васильевич** – аспирант кафедры технологии производства авиационных двигателей, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

**Хадживанд Масуд** – аспирант кафедры конструкции авиационных двигателей, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.