

УДК 621.3

НЕРАВНОВЕСНЫЕ ПРОЦЕССЫ ГАЗОДИНАМИКИ, ТЕПЛОМАССОБМЕНА И ГОРЕНИЯ В ГОРЕЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВАХ С ЗАКРУТКОЙ ПОТОКА

Гурьянов А.И., Пиралишвили Ш.А.

*Рыбинская государственная авиационная технологическая
академия им.П.А.Соловьева, Рыбинск, Россия*

ВВЕДЕНИЕ

Оптимизация рабочего процесса камеры сгорания (КС) во многом определяет возможность повышения КПД авиационных двигателей. При проектировании форсуночно-горелочных устройств (ФГУ), формирующих первичную зону КС, широко используется принцип закрутки течения, однако, известные конструкции практически не используют такие особенности закрученного потока как энергоразделение по полной энтальпии и формирование противотока периферийного и приосевого вихрей, позволяющие приблизить условия протекания процесса смесеобразования и горения к условиям в идеализированном гомогенном реакторе.

Предлагаемая вниманию статья отражает цикл теоретических и экспериментальных работ по исследованию рабочего процесса противоточных вихревых горелочных устройств (ПВГУ) авиацион-

ного назначения, реализующих эффект Ранка в вихревой камере энергетического разделения. Аэродинамика течения в камере сгорания ПВГУ отличается рядом особенностей [1-5], удовлетворяющих требованиям качественной смесеподготовки и стабилизации фронта пламени: высокой интенсивностью турбулентности, самоорганизацией и пространственно-временной квазистационарностью крупномасштабных вторичных вихревых структур, наличием рециркуляционных зон, возвратных течений и локальных областей повышенной температуры. Отмеченные особенности открывают широкие перспективы применения противоточных вихревых горелок для интенсификации тепломассообменных процессов в элементах авиационных двигателей.

ТЕРМОГАЗОДИНАМИКА ТЕЧЕНИЯ В ВИХРЕВЫХ ПРОТИВОТОЧНЫХ ГОРЕЛКАХ

Одной из основных проблем на пути создания высокоэффективных фронтальных форсуночно-горелочных модулей камер сгорания с учетом комплекса требований по эмиссионным характеристикам и гидравлическим потерям является обеспечение высококачественного распыла и эффективного смешения в максимально короткой и теплонапряженной зоне горения, позволяющее приблизиться к физической модели гомогенного реактора. Однако до сих пор эта задача остается нерешенной [2,3,6].

Трудность поиска единых концепций решения проблемы осложняется необходимостью расчета существенно трехмерных реагирующих турбулентных течений с закруткой и отсутствием для их описания адекватных универсальных моделей турбулентности и горения. Очевидно, поиск возможностей совершенствования принципов и схем организации процесса горения, требует научно-технических решений, в основе которых лежат недостаточно изученные физические явления. К числу таких явлений относится эффект Ранка, и, соответствующая ему термогазодинамическая структура закрученного потока.

Термогазодинамика течения в камере сгорания противоточных вихревых горелок, основы проектирования которых изложены в монографии [1] и ряде работ [2-5], характеризуется комплексом свойств: интенсивный энергомассообмен в радиальном направлении, генерация зон повышенной энтальпии, формирование противоположно направленных вдоль оси вихревой камеры сгорания потоков, вращающихся по законам свободного и вынужденного вихрей. Практически присутствует полный перечень эффектов, способствующих гомогенизации компонентов и их интенсивному реагированию, с возможностью управления предпламенными процессами с целью приближения действительного механизма горения к диффузионному либо кинетическому без пространственного разделения зон смешения и горения.

Можно выделить следующие характерные особенности распределения параметров в камере вихревой противоточной горелки. В объеме вихревой камеры образуются два вихря – периферийный и приосевой, перемещающиеся в противоположных направлениях вдоль оси. Интенсивность закрутки периферийного потока вдоль камеры снижается и

формируется возвратное приосевое течение. По мере продвижения к выходному сечению приосевые массы газа, в процессе турбулентного энерго-массообмена с периферийным вихрем, увеличивают свою окружную составляющую скорости, ослабляя его интенсивность. Закрученное течение в вихревой горелке существенно трехмерно и нестационарно, со значительными градиентами осевой составляющей скорости.

Такая особенность потока имеет наиболее ярко выраженный характер, вследствие наличия интенсивного противотока. Нестационарное взаимодействие масс газа, вращающихся на различном расстоянии от оси, в результате влияния развитой крупно и мелкомасштабной турбулентности, приводит к образованию вторичных вихревых структур (рис.1) и формированию прецессирующего вихревого ядра потока

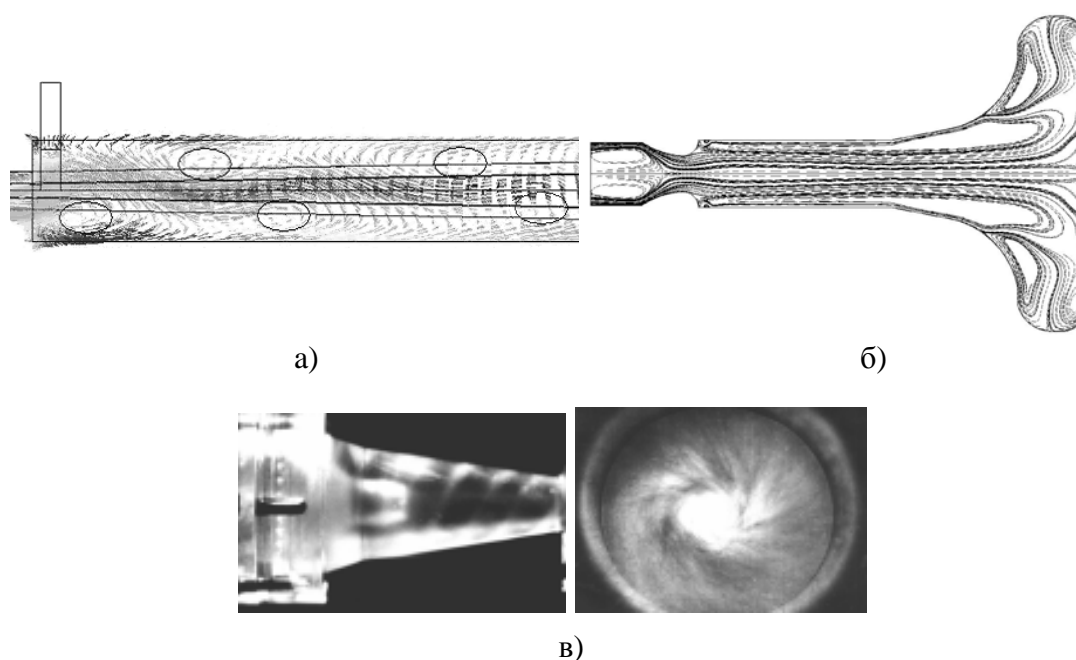


Рис.1. Крупномасштабные вихревые структуры в противоточной вихревой горелке. а), б) – численный расчет, в) - эксперимент

ГАЗОДИНАМИЧЕСКАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ ПЛАМЕНИ В ПОТОКЕ

Вопросы стабилизации пламени играют важную роль при организации рабочего процесса основных и форсажных камер сгорания авиационных двигателей, поскольку уменьшение габаритов камеры связано с увеличением среднерасходной скорости потока, а последняя лимитируется условиями срыва пламени. В камерах сгорания ГТД задача стабилизации пламени решается различными конструктивными приемами, но все они основаны на создании определенной газодинамической структуры потока с зоной обратных токов, выступающей источником непрерывного воспламенения потока свежей смеси.

Применение газодинамических стабилизаторов пламени позволяет изменять размер рециркуляционной зоны, её химический состав и локальное положение в области камеры в зависимости от режима ее работы, что является несомненным преимуществом перед механическими стабилизаторами в

виде плохообтекаемых тел и способствует снижению гидравлических потерь, за счёт минимизации вносимых в поток возмущений.

Процесс стабилизации целесообразно организовывать на радиально вдуваемых закрученных струях, сформированных в виде факела высокоэнтальпийных продуктов сгорания. Такие струи содержат определенное количество активных центров, способствующих воспламенению основного потока топливовоздушной смеси. Использование в качестве устройств запуска вихревых воспламенителей, автотельных от условий в камере сгорания позволяет расширить диапазон высотного и «холодного» запуска.

Как показывают результаты экспериментальных и численных исследований закрученная струя, вдуваемая в сносный поток, является своеобразным плохообтекаемым телом (рис.2).

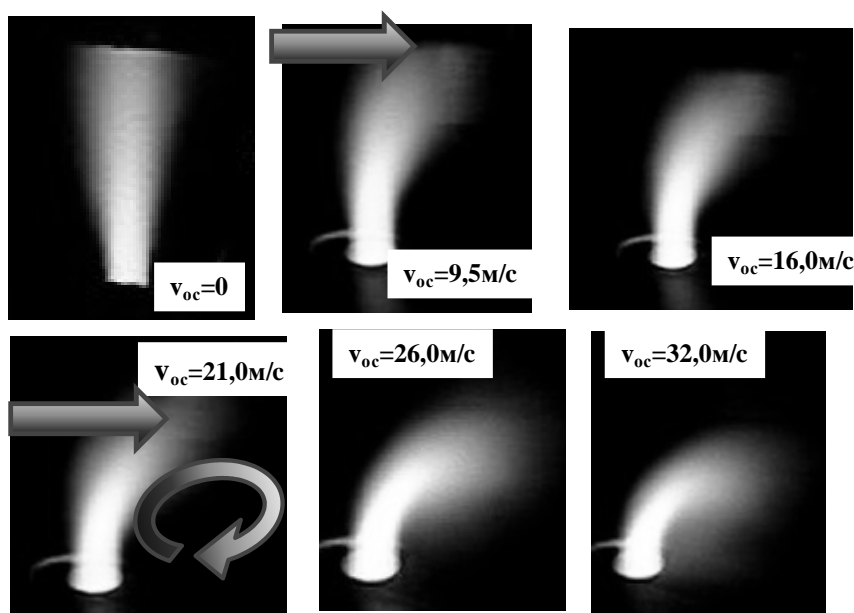


Рис.2. Образование зоны обратных токов при радиальном вдуве закрученной струи в сносящий поток

Под воздействием сносящего потока струя деформируется, ее ось искривляется, а поперечное сечение приобретает подковообразную форму, образованную парой крупномасштабных тороидальных вихрей, закрученных в противоположные стороны. В центральной части, вблизи стержневой струи, наблюдается значительное снижение скорости течения и образуется устойчивая зона обратных токов, форма и параметры которой определяются

характеристиками закрученной струи. Физическая картина процесса (рис.3) в этом случае подобна применению механических стабилизаторов, то есть условия стационарного положения фронта пламени определяются совокупным влиянием теплового и аэродинамического механизмов стабилизации. Исследования газодинамической стабилизации пламени проводились на малоразмерной модели проточной камеры сгорания (рис.4).

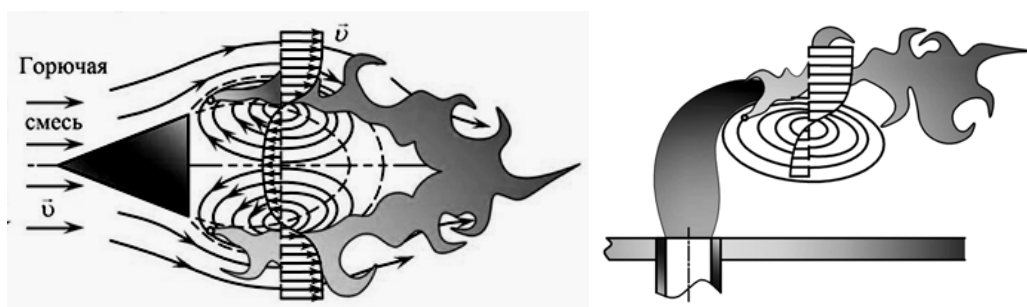


Рис.3. Механизмы стабилизации пламени в потоке

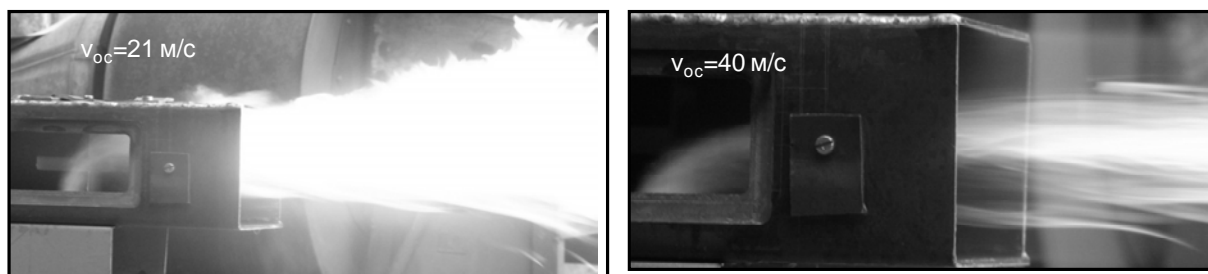


Рис.4. Воспламенение смеси и стабилизация пламени в модельной КС закрученной струей

При критическом перепаде давления реализуются режимы работы вихревых воспламенителей, на которых параметры факела практически не зависят от слабых возмущений среды, в которую происходит истечение. О наличии сверхзвуковой скорости на выходе $1,0 < M < 1,2$, можно судить по бочкообразным формам факела, истекающего из

отверстия сопла диафрагмы вихревой горелки воспламенителя (рис 5).

Одно из свойств вихревых горелок - устойчивость вихревого огневого жгута - факела продуктов сгорания, может быть с успехом использовано в авиации для запуска камер сгорания ГТД.

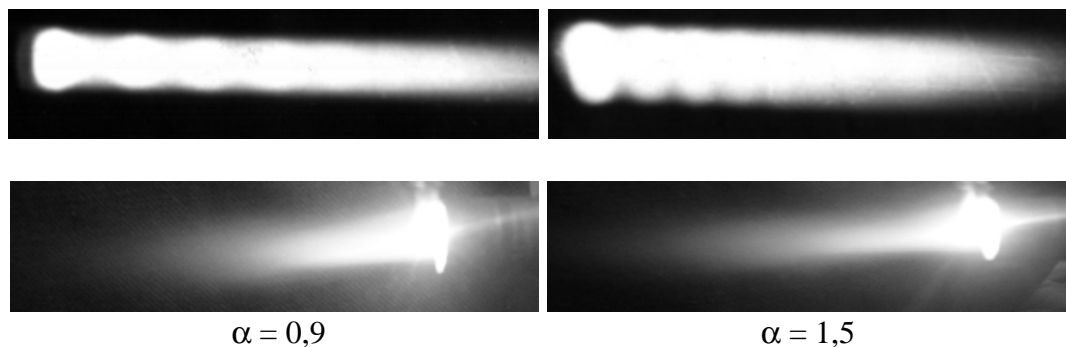


Рис.5. Факелы продуктов сгорания на различных режимах работы воспламенителя

НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ВИХРЕВЫХ ПРОТИВОТОЧНЫХ ГОРЕЛКАХ. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Моделирование процессов теплообмена в турбулентных потоках с крупномасштабными отрывными зонами является одной из малоизученных задач численного исследования процессов вынужденной конвекции. Результаты расчетов с использованием RANS чувствительны к выбору замыкающей полуэмпирической модели турбулентности, и иногда не способны отразить характерные особенности, присущие закрученным течениям с энергомассообменом. Трехмерные расчеты газодинамически сложных турбулентных течений на основе ряда моделей RANS показывают, что свойственная этим моделями генерация высокого уровня

турбулентной вязкости препятствует развитию крупномасштабных нестационарных пульсаций, которые определяют структуру осредненного движения и теплообменные процессы, к числу которых можно отнести и наблюдаемый в эксперименте [1,4] эффект энергоразделения по полной энтропии у периферийного и приосевого вихрей.

Закрученное течение в вихревой камере является существенно трехмерным и нестационарным со значительными градиентами осевой составляющей скорости и прецессирующим вихревым ядром потока (рис.6).

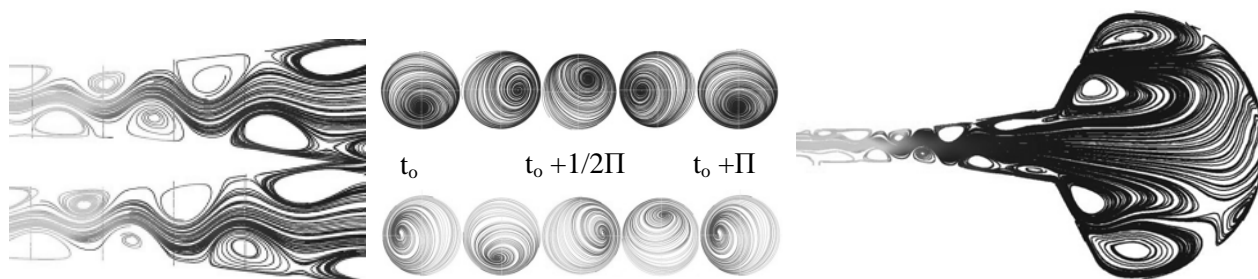


Рис.6. Визуализация течения и прецессирующего вихревого ядра в противоточной горелке [3]. t_0 - произвольный момент времени, Π - период прецессирующего вихревого ядра

Вихревые структуры за счет непрерывного транспорта массы газа из приосевой областей в периферийную и обратно, обуславливают перенос момента импульса вращательного движения, необходимого для раскрутки приосевого вихря. Как показали исследования при работе вихревой горелки в качестве воспламенителя максимальная эффективность стабилизации достигается при условии критического истечения продуктов сгорания.

На рис.7 показана зависимость числа Маха, рассчитанного по среднерасходной полной скорости в критическом сечении и на срезе сверхзвукового сопла горелки, в зависимости от степени расширения π^* .

При значении $\pi^* \approx 2,5$ в критическом сечении происходит переход через скорость звука. Процесс является существенно нестационарным и в интервале $2,5 < \pi^* < 3,0$ относительная скорость колеблется вблизи $M = 1$. При последующем увеличении давления воздуха на входе, течение в сопле стабилизируется и на срезе устанавливается сверхзвуковая скорость с $M = 1,3$.

Переход через скорость звука сопровождается скачкообразным увеличением числа Эйлера Eu , характеризующего рост коэффициента гидравлических потерь. При дальнейшем увеличении степени расширения π^* , критерий Eu устанавливается на постоянном уровне и практически не зависит от числа Re (рис.8).

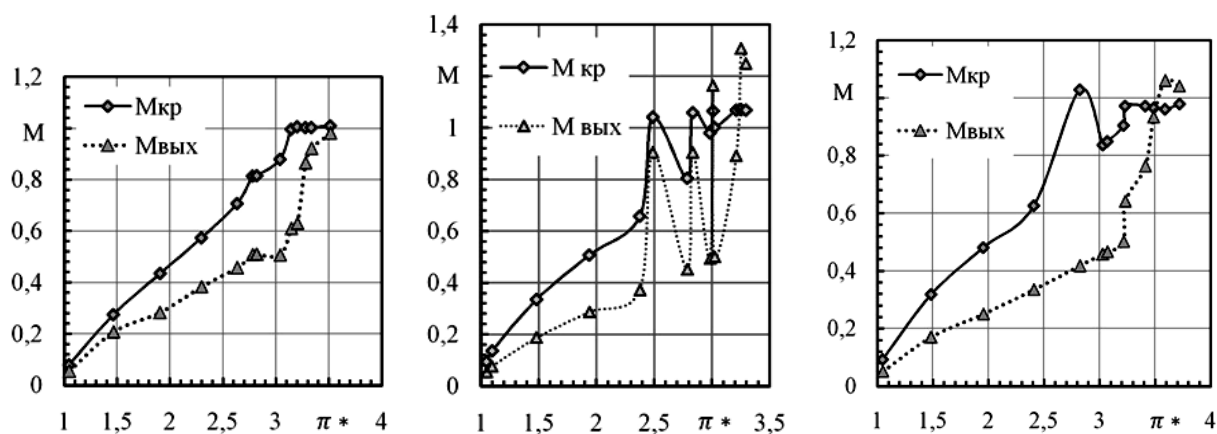


Рис.7. Зависимость числа Маха в критическом и выходном сечении сопла от степени расширения

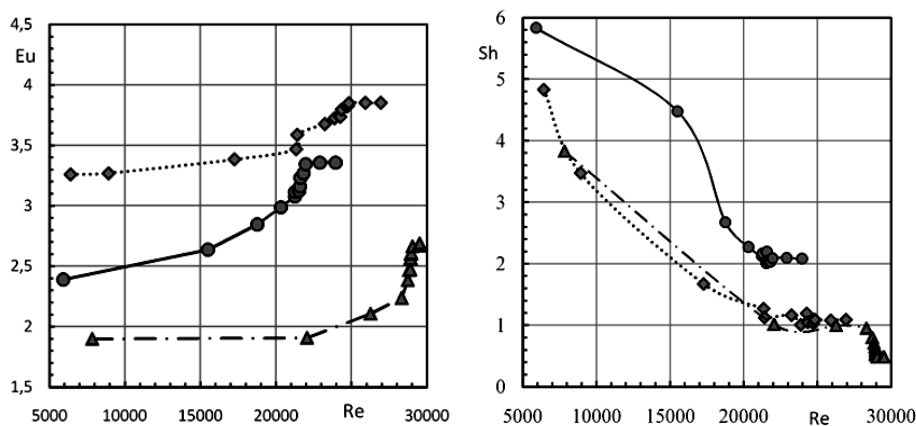


Рис.8. Зависимость чисел Эйлера и Струхала от числа Рейнольдса

Организация критического истечения факела продуктов сгорания, требует решения проблемы стабилизации пламени в объеме проточной части вихревой горелки. Исследования показывают, что наличие прецессирующего вихревого ядра отрицательно сказывается на надежности стабилизации. Интенсивная прецессия приосевого потока вносит существенную нестационарность и вызывает пространственное колебание зоны воспламенения. Это приводит к возбуждению нелинейных механизмов обратной связи и развитию собственной неустойчивости пламени к газодинамическим и тепловым

возмущениям потока, что вызывает его колебания и увеличивает вероятность срыва.

Выполненные исследования влияния геометрии вихревой горелки на отмеченные процессы позволили предотвратить их развитие, за счет исключения возможности проникновения прецессирующего ядра в зону воспламенения. На рис.6 показано, что прецессия приосевого потока затухает при значении относительной длины $L/D_K = 6,5$ не проникая в область стабилизации, при всех значениях степени расширения π^* и интенсивности прецессии потока в вихревой камере горелки.

ПРИМЕНЕНИЕ ВИХРЕВЫХ ПРОТИВОТОЧНЫХ ГОРЕЛОК К СОЗДАНИЮ ФОРСУНОЧНО-ГОРЕЛОЧНЫХ МОДУЛЕЙ КАМЕР СГОРАНИЯ ГТД

Практика показывает, что существует ряд задач, в которых необходимо обеспечить надежное горение при отсутствии заметного перепада давления, например при создании высокоэффективных конструкций форсуночно-горелочных модулей, формирующих первичную зону камер сгорания. Это потребовало создания низкоперепадных вихревых горелок, эффективно работающих в условиях предельно низких значений степени расширения в диапазоне $1,02 < \pi^* < 1,05$, и позволило рассмот-

реть вопрос о применении низкоперепадной вихревой противоточной горелки в качестве форсуночно-горелочного модуля для перспективной камеры сгорания. Её срывные характеристики приведены на рис.9. Эксперимент подтвердил правильность предположений относительно условий организации стабилизации пламени в зоне воспламенения при низкоперепадной схеме подачи окислителя. Максимальный диапазон устойчивой работы находится в области значений степени расширения $\pi^* \approx 1,05$.

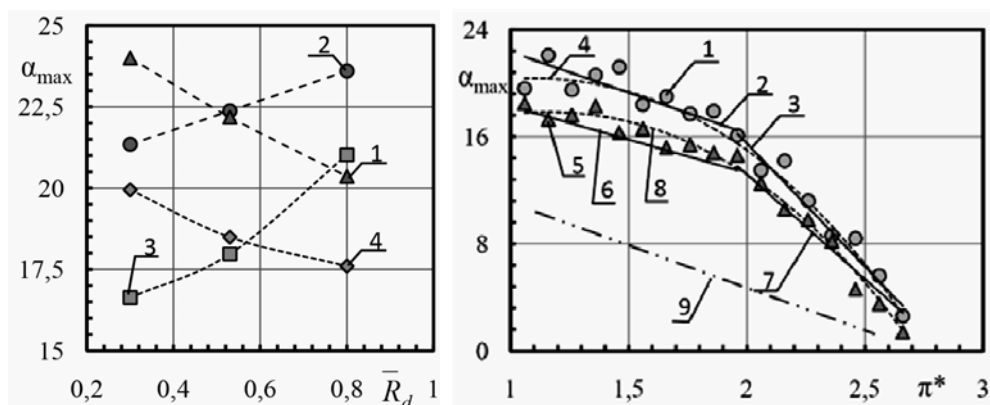


Рис.9. Концентрационные границы срыва пламени в области «бедных» смесей. 1,5 – эксперимент; 2,3,6,7 – расчет по критериальным уравнениям; 4,8 – расчет по регрессионному уравнению

Оценка механизма горения в вихревых противоточных горелках экспериментально подтвердила предположение о приближенности процесса горения к условиям гомогенного реактора, по сравнению с известными устройствами сжигания топлива других типов (рис.10).

Результаты обработки опытных данных, с помощью критериальной базы рабочего процесса вихревых горелок и использования локального и интегрального критериев механизма горения позволили определить степень приближенности про-

цессов в противоточной горелке к реактору идеального перемешивания.

Во всем диапазоне режимных параметров реализуется процесс турбулентного горения $Re_t > 1$. Оценка механизма процесса показала, что одновременное приближение к модели гомогенной зоны горения с точки зрения локального и интегрального параметров невозможно. В гомогенном реакторе критерий Дамкёлера (интегральный параметр) принимает значения $Da_t \sim 10^{-3}$, а критерий Карловитца (локальный параметр) $Ka_t \sim 10^4$. В действительности при уменьшении Da_t значения Ka_t также

уменьшаются. Малые значения числа Дамкелера $Da_t \sim 10^{-2}$ имеют место при горении околостехиометрических смесей, в этом случае число Карловитца также минимально $Ka_t \sim 1$ поскольку на таких режимах значительно увеличивается скорость нормального горения U_n и на пространственных масштабах порядка длины Колмогорова турбулентный фронт пламени ламинаризуется. Физически это означает удаление от условий идеального перемешивания. При отклонении в область нестехиометрического горения («богатую» либо «бедную») происходит обратный эффект при этом чис-

ло Карловитца принимает значения $Ka_t \sim 10^2$ а критерий Дамкелера увеличивается до $Da_t \sim 1$, то есть условия качественного перемешивания на микро-масштабах компенсируются низкой скоростью окислительно-восстановительных реакций и увеличением вероятности уноса из зоны горения непрореагировавших элементов смеси крупномасштабными турбулентными пульсациями закрученного потока. Исследования показали, что оптимальное соотношение отмеченных процессов реализуется в двух областях по составу смеси $\alpha = 0,6$ и $\alpha = 2,2$

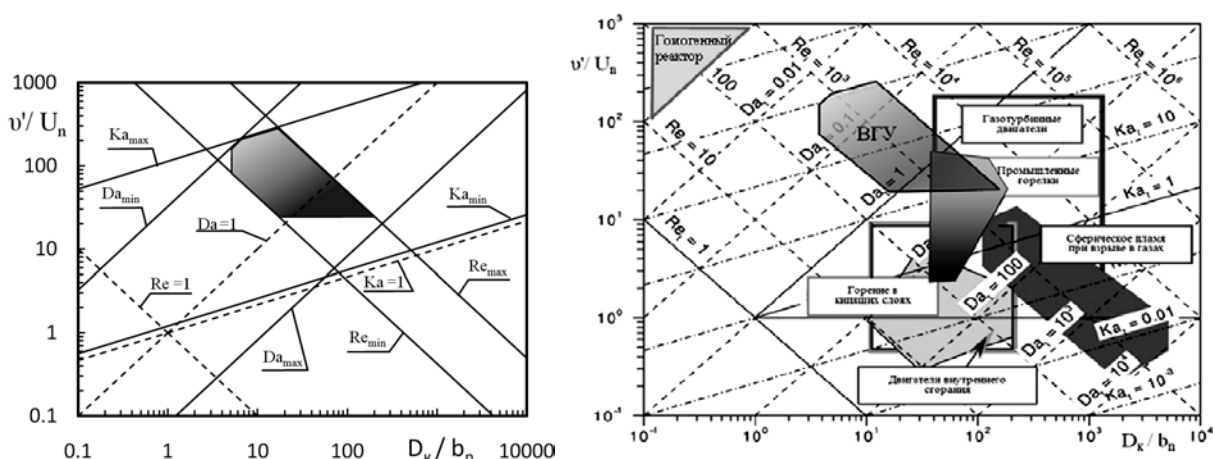


Рис.10. Сравнительная оценка механизмов горения в противоточной вихревой горелке и известных технических устройствах [6]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные расчетно-экспериментальные исследования вихревых горелочных устройств и подтвердили целесообразность их применения для создания условий газодинамической стабилизации

пламени в потоке, организации горения в первичной зоне камер сгорания двигателей авиационного назначения, позволили обосновать преимущества вихревой противоточной схемы горения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пиралишвили, Ш.А. Вихревой эффект. Эксперимент, теория, технические решения [Текст] / Ш.А.Пиралишвили, В.М.Поляев, М.Н.Сергеев; под ред. Леонтьева А. И. – М.: УНПЦ «Энергомаш», 2000. – 412 с.
2. Гурьянов, А.И. Вихревые горелочные устройства [Текст] / А.И.Гурьянов, О.В.Казанцева, М.В.Медведева, Ш.А.Пиралишвили // Инженерный журнал. – 2005. – №5. – прил. – С. 8 – 15.
3. Пиралишвили, Ш.А. Аэродинамика закрученного потока в вихревых горелках [Текст] / Ш.А.Пиралишвили, А.И.Гурьянов, Ахмед Мамо Демена, С.М.Хасанов // Авиакосмическое приборостроение. – 2007. – №9. – С. 3 – 8.
4. Законы горения [Текст]; под общ. ред. Ю. В.Полежаева. – М.: Энергомаш, 2006. – 352с.
5. Piralishvili, Sh.A. Development and investigation of a vortex burner [Text] / Sh.A. Piralishvili, A.I.Gurianov, F.Ali // Nonequilibrium Processes. Vol. 1. Combustion and Detonation. Edited by G.D.Roy, S.M.Frolov, A.M.Starik. – Moscow: Torus Press Ltd., 2005. – P. 132 – 139.
6. Hoffman Arne B. Modellierung turbulenter Vormischverbrennung [Text] / B.Arne Hoffman / Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Doktor der Ingenieurwissenschaften im Fach Chemieingenieurwesen. – Karlsruhe: Universität Karlsruhe, 2004. – 316 p.