

УДК 621.452.3

Исследование аэродинамики и массообмена в вихревых горелках камер сгорания газотурбинных двигателей.

А.М. Ланский, С.В. Лукачев, С.Г. Матвеев

Аннотация

Приводятся результаты исследований аэродинамической структуры течения и массообмена в вихревых горелках камер сгорания газотурбинных двигателей (ГТД). Приводится полученная эмпирическая зависимость времени пребывания топливно-воздушной смеси в зоне рециркуляции от масштаба горелки, степени закрутки, скорости истечения, состава смеси и способа её подачи.

Ключевые слова:

структура течения; массообмен; вихревая горелка; время пребывания; зона рециркуляции.

Выгорание топлива и стабилизация пламени в вихревых горелках определяются гидродинамикой течения, физико-химическими параметрами вытекающей из горелки топливно-воздушной смеси и массообменом между зоной рециркуляции и основным потоком. В силу многообразия схем горелок и влияющих факторов, показать влияние каждого из них в полном объеме не представляется возможным. Поэтому рассмотрим наиболее распространенный в практике сжигания топлива - вихревые горелки с цилиндрическим и диффузорным выходными насадками [1...5].

Структура течения в камере закручивания вихревой горелки представляет собой систему из двух вихрей, совершающих вращательно-поступательное движение (рис. 1).

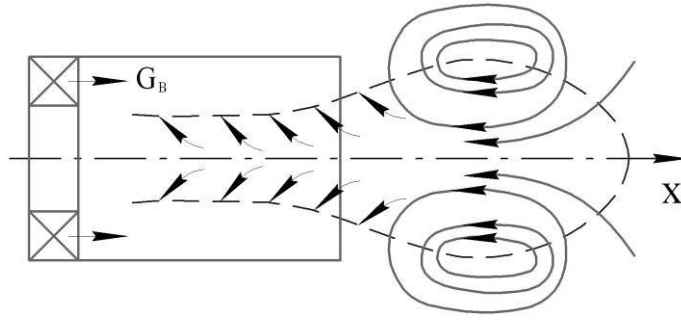


Рис. 1. Схема течения в вихревой горелке

Основной вихревой поток занимает периферийную часть камеры закручивания, а в её центральной области располагается индуцированный вторичный вихревой поток или зона обратных токов. В осевом направлении они движутся во взаимно противоположных направлениях, что обусловлено существованием вдоль оси значительного по величине положительного градиента давления (рис. 2). Встречное движение вихрей в поле центробежных сил вызывает взаимный обмен количеством движения, в результате которого возрастает интенсивность турбулентности, а на определенных режимах могут возникнуть низкочастотные регулярные пульсации скорости и давления в потоке.

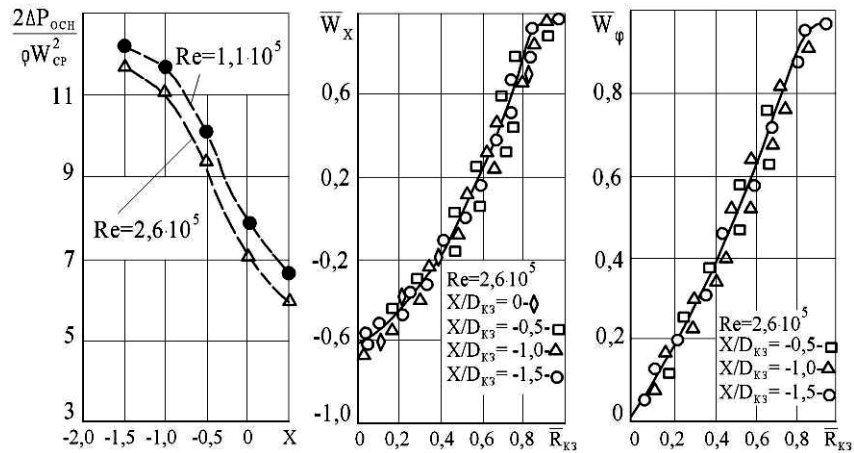


Рис. 2. Изменение осредненных параметров потока в вихревой горелке ($S_B = 2.82$)

Основными факторами, которыми можно воздействовать на течение в вихревых горелках, являются: степень закрутки (S_B), длина камеры закручивания (\bar{L}_{k3}), форма выходного насадка и режим работы. При затопленном течении эти факторы влияют на характер взаимодействия вихрей и связанные с ним потери момента количества движения периферийного потока внутри камеры закручивания, который играет важную роль в формировании зоны рециркуляции. Проведенные измерения показали (рис. 2), что

распределение осевой и тангенциальной скоростей типично для вихревых камер и циклонных топок.

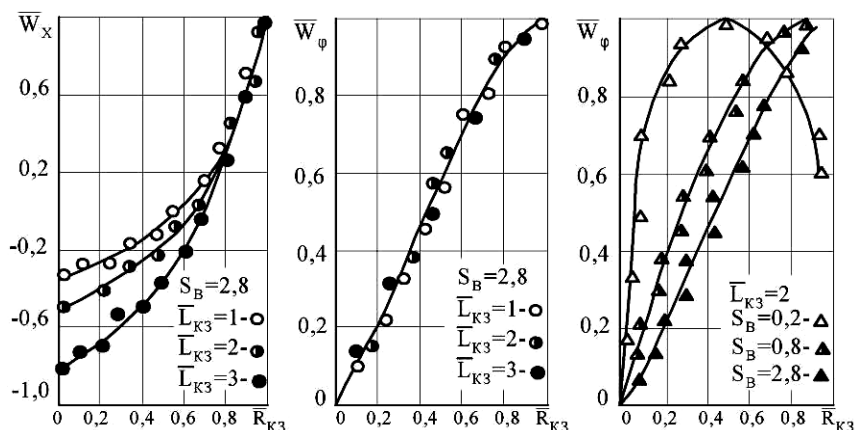


Рис. 3. Влияние геометрических параметров вихревой горелки на структуру течения ($Re = 2,6 \cdot 10^5$, $X/D_{K3} = 0$)

Увеличение длины камеры закручивания в пределах от $\bar{L}_{K3} = 1$ до $\bar{L}_{K3} = 3$ приводит к монотонному возрастанию осевой составляющей скорости в зоне обратных токов (рис. 3).

При этом осевая скорость в основном потоке и радиальное распределение (рис. 3) тангенциальной составляющей скорости по всему сечению канала остаются неизменными. Возрастание скорости возвратного течения, по всей вероятности, связано с развитием в потоке регулярных пульсаций скорости, способствующих интенсификации турбулентного энергообмена между периферийным потоком и зоной обратных токов.

В результате более интенсивной передачи кинетической энергии основной поток выносит большее количество массы ядра за пределы канала, осевой градиент давления возрастает, и скорость возвратного течения увеличивается.

О влиянии степени закрутки на распределение тангенциальной составляющей скорости наглядное представление дает рис. 3. С уменьшением закрутки максимум тангенциальной скорости смещается к оси и соответственно этому уменьшается диаметральный размер зоны обратных токов.

Анализ и обобщение результатов измерений осредненных параметров закрученного потока показали, что течение закрученной струи при наличии зоны обратных токов имеет универсальный характер, который может быть описан величиной

$$\Phi = \frac{W_{\varphi \max}}{(W_{x \max} - W_{x \text{ос}})},$$

где $W_{x \max}$ и $W_{\varphi \max}$ - максимальные значения осевой и тангенциальной скоростей, $W_{x \text{ос}}$ - значение осевой скорости на оси струи.

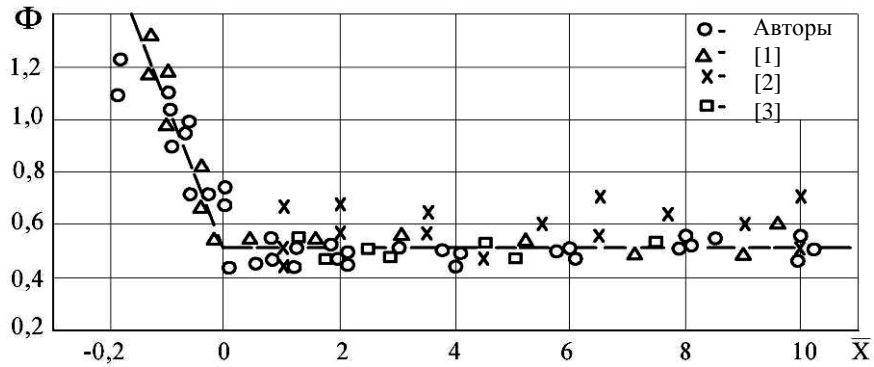


Рис. 4. Зависимость параметра Φ от продольной координаты ($\bar{X} = X/R_{\text{кз}}$)

Зависимость Φ от продольной координаты X (рис.4) в пределах зоны обратных токов постоянна и равна примерно 0,5. По мере продвижения внутрь горелки параметр Φ резко возрастает вследствие роста $W_{x_{\text{ос}}}$ оси и примерного постоянства $W_{\varphi_{\text{max}}}$ и $W_{x_{\text{max}}}$. Подобное изменение Φ , свидетельствующее о различии механизмов поддержания равновесия закрученного потока внутри вихревой горелки и в факеле, может быть использовано для моделирования ее рабочего процесса.

Что касается турбулентной структуры, то она в значительной степени определяется характером течения. При работе горелки на стационарном режиме максимальный уровень турбулентности наблюдается в области закручивающего устройства (рис.5). Это объясняется, с одной стороны, взаимодействием дискретных струй, вытекающих из завихрителя, а с другой стороны, проникновением зоны рециркуляции до задней стенки вихревой горелки. С увеличением числа Рейнольдса (в рассматриваемом случае $Re > 2,3 \cdot 10^5$) происходит переход на нестационарный режим работы. Пульсационная структура в канале и факеле вихревой горелки перестраивается (рис. 5).

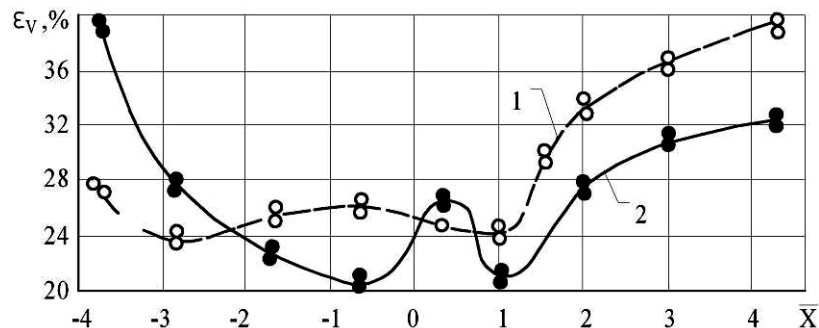
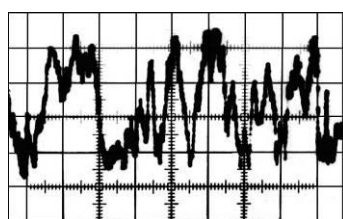


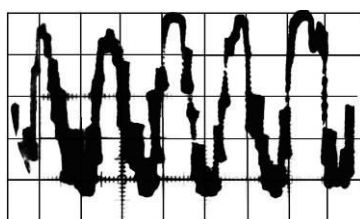
Рис. 5. Изменение интенсивности турбулентности на оси закрученной струи: 1 – нестационарный режим, 2 – стационарный режим

Максимум пульсаций вектора скорости смещается к выходу из горелки, что объясняется усилением взаимодействия прямого и обратного потоков вследствие возникновения свободной критической точки, препятствующей проникновению зоны обратных токов внутрь горелки.

Таким образом, при переходе на нестационарный режим работы происходит резкое изменение гидродинамической структуры течения. В потоке возникают мощные регулярные пульсации скорости и давления, сигнал с датчика термоанемометра приобретает синусоидальную форму (рис.6). Кроме того, изменяется характер зоны рециркуляции, от свойств которой в значительной степени зависит выгорание топлива и стабилизация пламени. Это обстоятельство послужило основанием для экспериментального исследования структуры и свойств зоны рециркуляции на двух рассмотренных выше режимах.



а)



б)

Рис. 6. Форма сигнала пульсаций
($X/R_{КЗ} = 0, S_B = 2,8$):
а – стационарный режим,
б – нестационарный режим



а)



б)

Рис.7. Форма факела на различных режимах
работы вихревой горелки ($S_B = 0,7$):
а – стационарный режим
б – нестационарный режим

С этой целью были проведены подробные измерения состава продуктов сгорания и температуры при подаче природного газа в зону рециркуляции на различных моделях вихревых горелок.

Визуальные наблюдения за процессом горения в зоне рециркуляции (рис.7), измерения полноты сгорания, состава смеси и температуры в ней показали (рис.8), что при переходе на нестационарный режим работы вихревой горелки зона рециркуляции внутрь горелки не проникает.

Подобная перестройка в структуре и свойствах зоны рециркуляции позволила несколько повысить полноту сгорания, но значительно ухудшила ее стабилизирующие свойства (рис.9), что объясняется уменьшением объема, зоны и увеличением турбулентного теплообмена на начальном участке факела. В случае работы вихревой горелки на природном газе для устранения некоторых недостатков, присущих нестационарному режиму, целесообразно выбирать ее конструктивные размеры в соответствии с рекомендациями, изложенными в работах [4,5].

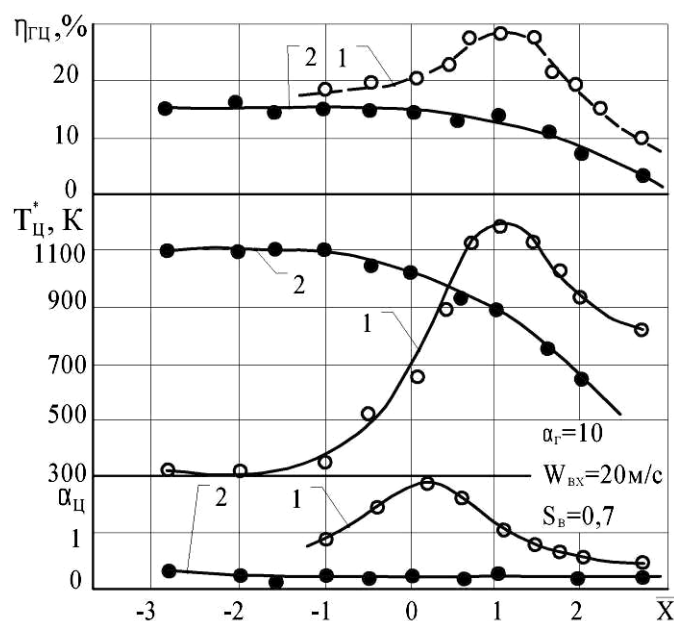


Рис.8. Изменение полноты сгорания, температуры и состава смеси вдоль оси факела вихревой горелки: 1 - нестационарный режим, 2 – стационарный режим $\eta_{ц}$, $T_{ц}^*$, $\alpha_{ц}$ – полнота сгорания, температура и коэффициент избытка воздуха при срыве пламени

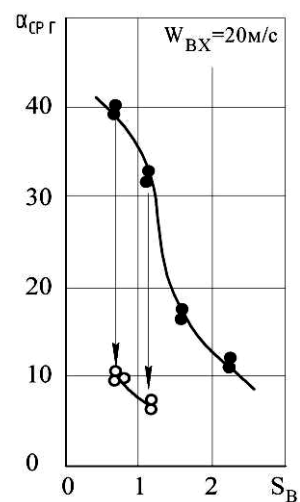


Рис.9. Влияние режима работы горелки на «бедную» границу срыва пламени $\alpha_{ср г}$ – коэффициент избытка воздуха при срыве пламени

В практической деятельности подобные режимы горелок встречаются довольно редко, только в области «богатых» значений $\alpha_{г}$. Поэтому изучение массообменных свойств зоны рециркуляции и состава смеси в ней, в широком диапазоне конструктивных и режимных параметров, проводилось на стационарном режиме работы вихревой горелки.

Измерения состава продуктов сгорания по длине и радиусу зоны рециркуляции показали, что благодаря высокому уровню турбулентности происходит интенсивное перемешивание топлива и воздуха.

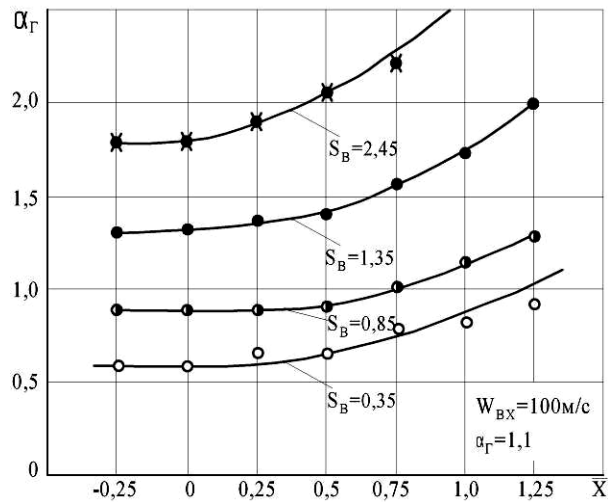


Рис. 10. Влияние закрутки воздуха на состав смеси в зоне рециркуляции

В результате этого в объеме зоны образуется смесь, горящая в режиме, близком к режиму горения предварительно перемешанной горючей смеси. Однако по длине зоны рециркуляции состав смеси и температура несколько увеличиваются (рис.10). Полнота сгорания в зоне рециркуляции при диффузионном горении не остается постоянной в отличие от горения гомогенной смеси. Наблюдается общая закономерность ее падения с уменьшением

коэффициента избытка воздуха (рис.11). Увеличение степени закрутки воздуха приводит к его эжекции в зону и при $S_B \approx 1.4$ состав смеси в ней стабилизируется, а полнота сгорания принимает постоянное значение (рис.11).

Подобное протекание характеристик зоны рециркуляции связано с тем, что скорость возвратного течения различна в различных точках. Так, наблюдается некоторое обогащение состава смеси в начале зоны и обеднение в конце. Поэтому зона рециркуляции вихревой горелки имеет кинетические и диффузионные свойства, а характеристики ее рабочего процесса должны определяться кинетическими и диффузионными параметрами. В первом приближении же рабочий процесс в зоне рециркуляции можно моделировать гомогенным реактором. Подобная ее идеализация позволяет в критериальном виде выявить влияние различных факторов на механизм выгорания топлива и стабилизацию пламени в вихревых горелках.

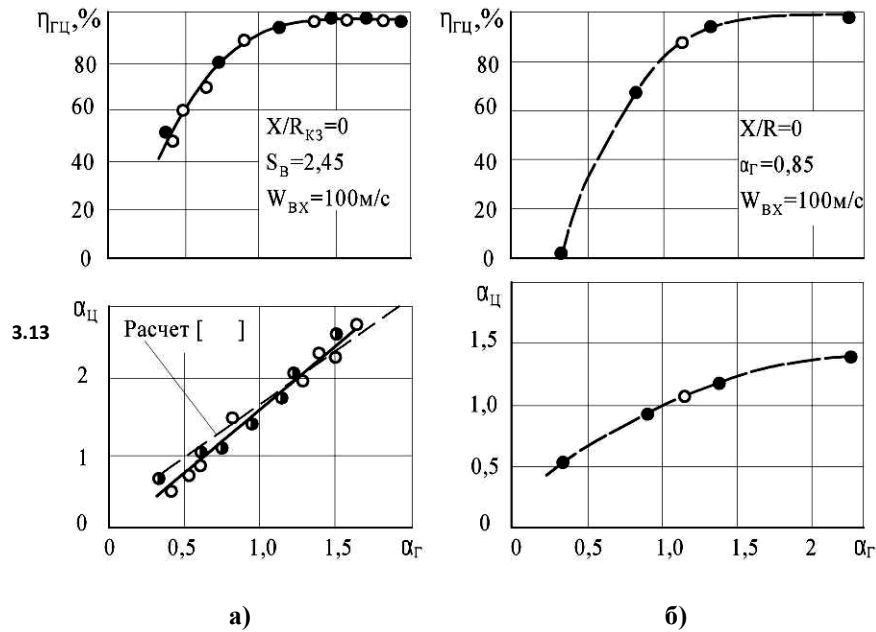


Рис. 11. Влияние α_r на характеристики зоны рециркуляции

Для правильного физического и теоретического описания рабочего процесса вихревых горелок необходимо иметь надежные экспериментальные данные и обобщения о массообмене между зоной рециркуляции и основным потоком, интенсивность которого косвенно можно оценить по величине среднего времени пребывания газа в зоне.

Выполненные измерения показали, что $\tau_{пр}$ зависит от масштаба горелки, степени закрутки, скорости истечения, состава смеси в зоне рециркуляции и способа ее подачи. Качественная зависимость $\tau_{пр}$ от геометрических размеров и скорости потока одинакова для плохообтекаемых тел и вихревых горелок (рис.12).

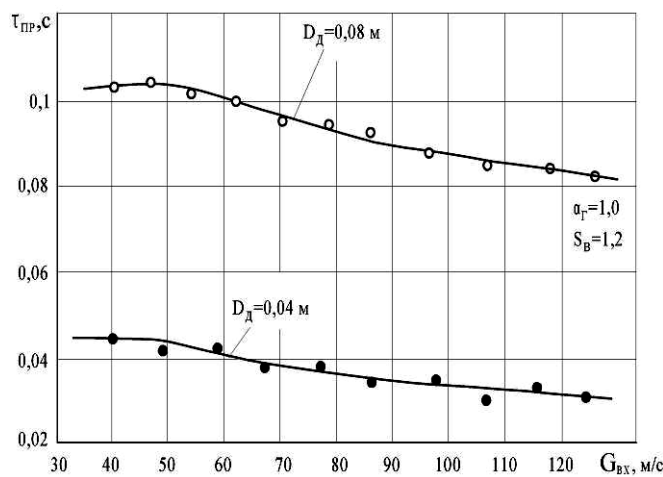


Рис. 12. Влияние скорости воздуха на входе в горелку и диаметра диффузорного насадка на время пребывания в зоне рециркуляции

В количественном выражении времена пребывания сильно отличаются. Так, в зависимости от закрутки безразмерное время пребывания

$$Z = \frac{\tau_{пр} G_{вг}}{D_{кз}},$$

для исследуемых вихревых горелок при горении изменялось от 5 до 75 (рис.13), а для уголковых стабилизаторов по данным работы $Z \approx 104$. Подобное различие связано с тем, что интенсивность турбулентности в закрученной струе выше,

чем за уголковым стабилизатором.

Поскольку $\tau_{пр}$ зависит от степени закрутки, то выражение для Z после некоторых преобразований было приведено к виду

$$Z_s = \frac{\tau_{пр} G_{вг}}{\rho_n D_{кз}^3 S_B^{0,65}},$$

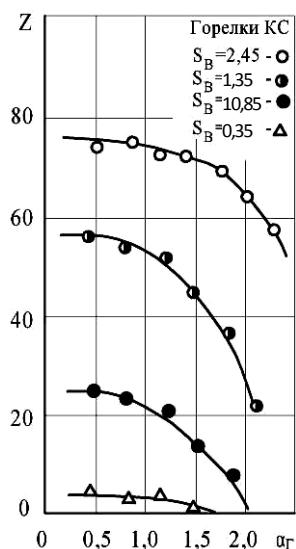


Рис. 13. Изменение Z в зависимости от закрутки воздуха

где ρ_n - плотность воздуха на входе в горелку; $G_{вг}$ - расход воздуха через горелку.

Тогда в широком диапазоне изменения конструктивных схем горелок и степеней закруток безразмерное время пребывания Z_s при диффузионном горении природного газа изменяется в пределах от 5 до 9,5 (рис.14). На основных режимах работы $Z_s \approx 9,5$, а на режимах, близких к "бедному" срыву, $Z_s \approx 5,5$. В отличие от горения гомогенной смеси Z_s при диффузионном горении протекает более полого (рис.14), что объясняется наличием переобогащенных топливом зон, способствующих достижению максимальной эффективности горения не при стехиометрическом составе смеси, а при $\alpha_{ц} = 1,2$.

Принципиальным отличием процесса массообмена в вихревых горелках от случая уголковых стабилизаторов является зависимость времени пребывания от состава смеси в зоне рециркуляции (рис.13 и 14).

Если в зоне отрыва уголковых стабилизаторов $\tau_{пр}$ примерно постоянно в диапазоне $\alpha_G = 0,84...1,45$, то в вихревых горелках $\tau_{пр}$ изменяется примерно в 2 раза. Вероятная причина подобного протекания $\tau_{пр}$ - его взаимосвязь с интенсивностью тепловыделения в зоне, которая зависит от $\alpha_{ц}$. При уменьшении $\alpha_{ц}$ от нижнего предела концентрационного горения до $\alpha_{ц} \approx 1...1,2$ повышается температура в зоне рециркуляции, что вызывает уменьшение плотности газа и градиентов давления.

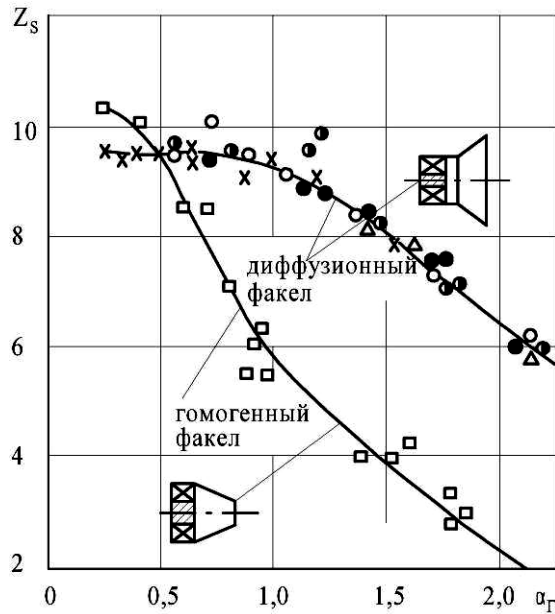


Рис. 14. Зависимость безразмерного времени пребывания от коэффициента избытка воздуха

Это приводит к нарушению динамического равновесия в поле центробежных сил, и размеры зоны увеличиваются, принимая новое равновесное состояние, соответствующее балансу сил центростремительного ускорения и радиального градиента давления.

Изложенные выше экспериментальные данные позволили уточнить некоторые особенности рабочего процесса вихревых горелок на различных режимах работы и обобщить массообменные свойства зоны рециркуляции в виде параметра Z_s .

Библиографический список

1. Турбулентное слежение газовых струй; под ред. Г.Н. Абрамовича. – М.: Наука, 1974. – 272с.
2. Аэродинамика закрученной струи; под ред. Р.Б. Ахмедова. – М.: Энергия, 1977. – 240с.
3. Ю.А. Кныш Влияние температуры окружающей среды на работу вихревого генератора звука. Ю.А. Кныш, С.В. Лукачев. Некоторые вопросы исследования вихревого эффекта и его промышленного применения: сб. науч. тр. КуАИ. – Куйбышев, 1974. – С. 52-56.
4. А.Ф. Урывский Исследование нестационарных режимов работы вихревых горелок авиационных газотурбинных двигателей: автореф. дис. канд. техн. наук А.Ф. Урывский. – Куйбышев, 1982. – 22с.

5. А.Н Белоусов. Применение вихревых горелок в авиационных ГТД наземного использования. А.Н. Белоусов, Ю.А. Кныш. Наземное применение авиационных двигателей в народном хозяйстве: сб. науч. тр. – М.: ВИМИ, 1977. Вып. 2(4). – С. 227-231.

Сведения об авторах

1. Ланский Анатолий Михайлович, доцент Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева (национальный аэрокосмический университет), к.т.н.

СГАУ, Московское ш., 34, Самара, 443086; тел.: (846) 267-44-46; e-mail: lansky@ssau.ru

2. Лукачев Сергей Викторович, заведующий кафедрой Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева (национальный аэрокосмический университет), д.т.н., профессор.

СГАУ, Московское ш., 34, Самара, 443086; тел.: (846) 267-43-05; e-mail: lukachev@ssau.ru

3. Матвеев Сергей Геннадьевич, доцент Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева (национальный аэрокосмический университет), к.т.н.

СГАУ, Московское ш., 34, Самара, 443086; тел.: (846) 267-43-92; e-mail: pfu@ssau.ru