

УДК 536.46:532.517.4

С. А. БОЛЕГЕНОВА

ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНОГО УРОВНЯ ТУРБУЛЕНТНОСТИ НА ПУЛЬСАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФАКЕЛА

Получено численное решение задачи о турбулентном горении метана в плоской камере сгорания. Исследовано влияние подъемной силы и начального уровня турбулентности на осредненные, пульсационные характеристики диффузионного факела.

Диффузионное горение газов – сложный процесс, характеризующийся взаимодействием химических реакций с процессами переноса и конвекции. Необходимость совершенствования технологических горелок и камер сгорания транспортных двигателей стимулирует дальнейшее развитие математических моделей диффузионного пламени.

Особенность диффузионного горения заключается в том, что скорость горения определяется не кинетическими параметрами (энергия активации, тепловой эффект реакции и др.), а условиями смешения реагентов, т.е. физическими параметрами, в частности, гидродинамикой течения. Поэтому важно знать, какую роль играют в развитии диффузионного факела такие параметры, например, как начальные скорости, концентрации и температуры исходных веществ, начальный уровень турбулентности, внешние силы, геометрия камеры сгорания, температурные условия на границах и др [1-5].

Реагирующие течения являются сжимаемыми, так как плотность зависит от температуры и молярной массы смеси, которые сильно изменяются в процессе горения. Так, температура во фронте пламени может в несколько раз превышать температуру окружающей среды или стенок камеры сгорания; молярная масса смеси зависит от концентраций всех компонент, которые также меняются в широком интервале – от начальных значений до нуля (концентрации топлива и окислителя) или от нуля до стехиометрических значений (концентрации продуктов реакции).

Поскольку плотность реагирующей смеси является функцией координат и достаточно сильно изменяется в поперечном направлении, то на распространение диффузионного факела существенное влияние оказывает подъемная сила или сила Архимеда.

Влияние параметров турбулентности на процесс сгорания является весьма неоднозначным в условиях закрытого процесса. Сжигание газообразного топлива в факеле характеризуется тесным взаимодействием газодинамических факторов потока, явлений диффузии, конвективного и радиационного теплообмена и процессов химических превращений, сопровождающихся интенсивным выделением тепла. Исключительная сложность взаимодействия указанных процессов объясняет отсутствие в настоящее время физически достаточно обоснованной общей теории горения в факеле, а построение методики строгого расчета его в настоящее время невозможно. Чрезвычайная сложность протекающих в факеле процессов определяет приближенный, схематизированный подход к его расчету, применение большого числа различных импирических и полуимпирических расчетных методик.

Турбулентные течения с химическими реакциями привлекают пристальное внимание многих исследователей из-за их возрастающего научного и прикладного значения. Гидродинамика турбулентных течений – одна из областей прикладной науки, которая богата теоретическими и экспериментальными проблемами и имеет фундаментальное и практическое значение. Если в турбулентных потоках происходят химические реакции, в том числе горение, проблема приобретает новые грани; обширная область турбулентных течений перекрывается с другой областью гидромеханики – аэротермохимией, которая объединяет гидродинамику, термодинамику и химию. В результате возникают чрезвычайно сложные проблемы, включающие взаимодействие турбулентных движений с химическими и термодинамическими процессами, связанными с горением. Проблемы увеличения эффективности сжигания и уменьшения выбросов в разнообразных установках, от электростанций до авиационных турбин,

а также создания новых устройств, таких, как газодинамические лазеры, требуют совершенствования методов описания и расчета таких течений [6, 7].

Горячим факелом или просто факелом называется определенный объем движущихся газов, в котором совершаются процессы горения. Понятия «факел» и «пламя» идентичны, однако в теплотехнике под факелом понимается обычно частный случай пламени, а именно – пламя, возникающее в результате горения топлива, поступающего в рабочее пространство в виде топливо-воздушных струй и, как следствие, имеющее соответствующую форму. По своему характеру факел может быть гомогенным, когда в процессе горения участвуют только газообразные среды, или гетерогенным, как, например, при сжигании жидкого или пылевидного топлива. Подъемные силы, действующие на горячий факел, искривляют кверху ось горизонтально расположенного факела. При вертикальном расположении последнего подъемные силы сообщают частицам газа, составляющего факел, добавочное ускорение, что несколько усложняет аэродинамику факела.

Газовые факелы различают по ряду существенных признаков, отражающих гидродинамические и физические особенности явления и способы организации процесса. В соответствии с этим можно условно классифицировать газовые пламена по различным признакам – режиму течения, способу образования горючей смеси, характеру протекания процесса, геометрии факела и аэродинамической схеме движения. В зависимости от режима течения различают ламинарные и турбулентные пламена [8, 9]. Если в поле течения факела происходит переход от ламинарного движения к турбулентному, то образуются так называемые переходные факелы, в которых сочетаются ламинарная и турбулентная формы движения.

В работе [10] рассматривается задача о диффузионном горении турбулентной струи метана вдоль оси прямоугольного канала в спутном потоке окислителя. Схема задачи представлена на рис. 1.

В реальных условиях возможно образование нескольких соединений. Так, при горении метана образуются углекислый газ и пары воды. Реакции, как правило, идут в несколько ступеней, например, в реакции горения метана образуются

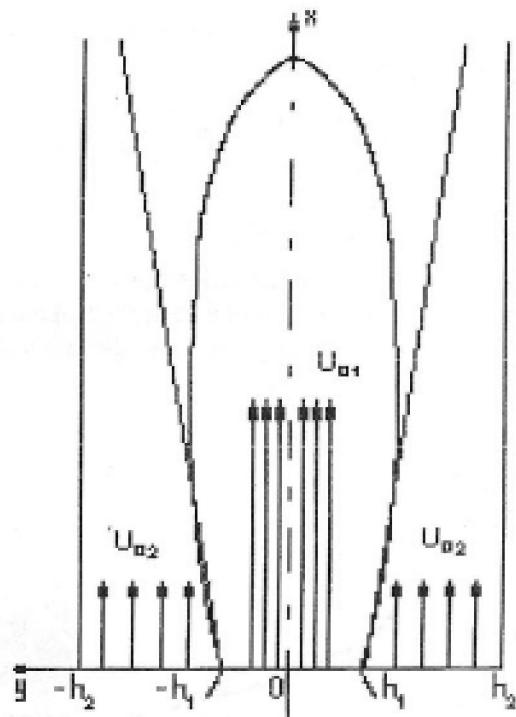


Рис. 1. Схема течения

такие промежуточные продукты реакции, как CH_3 , OH , CO , H_2 , O_2 и т.д. Однако в данной модели промежуточными реакциями можно пренебречь, так как рассматривается диффузионное горение, которое лимитируется не кинетикой химических реакций, а скоростью смешения компонентов.



С учетом сделанных в предположений система уравнений будет иметь следующий вид [10]:

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0. \quad (5)$$

Уравнение движения:

$$\begin{aligned} \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} &= \\ &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{\text{up}} \frac{\partial u}{\partial y} \right) + (\rho - \rho^*) g_x. \end{aligned} \quad (6)$$

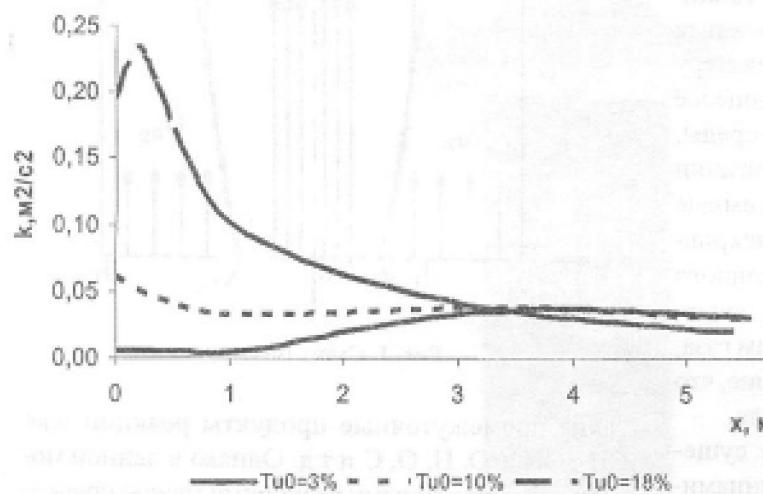
Уравнение энергии:

$$\rho u c_p \frac{\partial T}{\partial x} + \rho v c_p \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + Q_w. \quad (7)$$

Уравнение переноса для концентраций всех компонент смеси:

$$\rho u \frac{\partial c_i}{\partial x} + \rho v \frac{\partial c_i}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho D_i \frac{\partial c_i}{\partial y} \right) \pm w_i; \\ w = \rho^2 k_0 c_1^\alpha c_2^\beta e^{-\frac{E}{RT}}. \quad (8)$$

На рис. 2 приведено изменение кинетической энергии турбулентности на оси камеры сгорания при различных начальных уровнях турбулентных пульсаций.



На рис. 3–8 приведено распределение кинетической энергии турбулентности и уровня турбулентных пульсаций поперек камеры сгорания в различных сечениях, соответствующих областям в ядре факела, кроме $Tu_0 = 18\%$.

Из этих рисунков видно, что кинетическая энергия турбулентности имеет максимум в области фронта пламени, то есть горение турбули-

ирует течение. Это подтверждается рис. 7, на котором распределение k имеет однородный характер, а этот вариант соответствует $Tu_0 = 18\%$, при котором горение практически отсутствует.

Распределение уровня турбулентности отличается от распределения кинетической энергии турбулентности тем, что в первом случае кроме максимума во фронте пламени имеется максимум

Рис. 2. Влияние начального уровня турбулентности на изменение кинетической энергии турбулентности на оси камеры сгорания

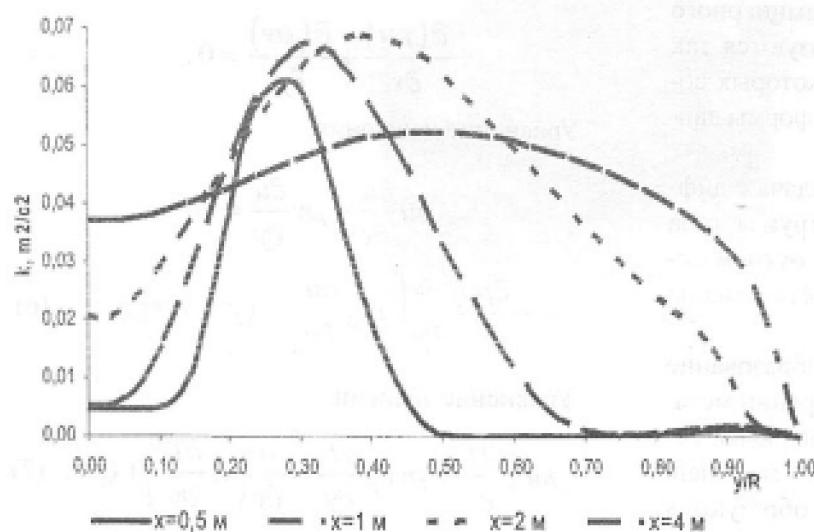


Рис. 3. Распределение кинетической энергии турбулентности при $Tu = 3\%$

Рис. 4. Распределение уровня турбулентности при $T_u = 3\%$

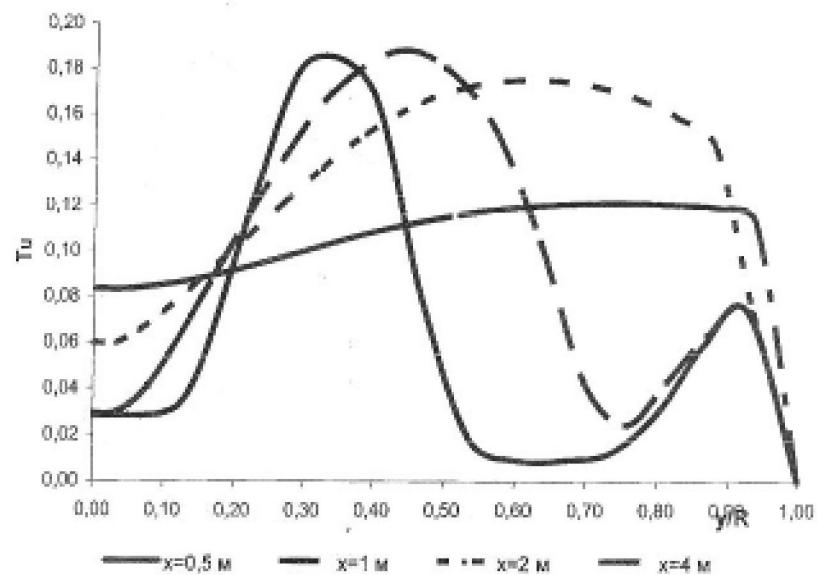


Рис. 5. Распределение уровня турбулентности при $T_u = 10\%$

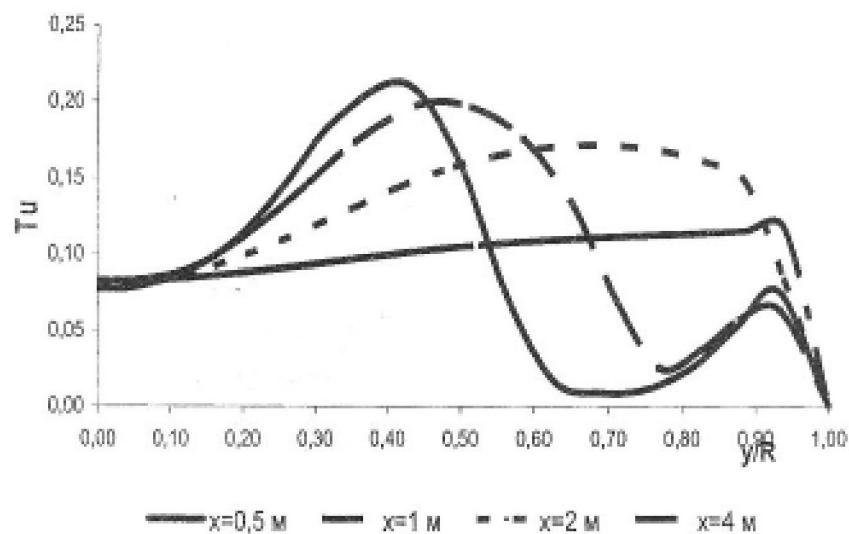
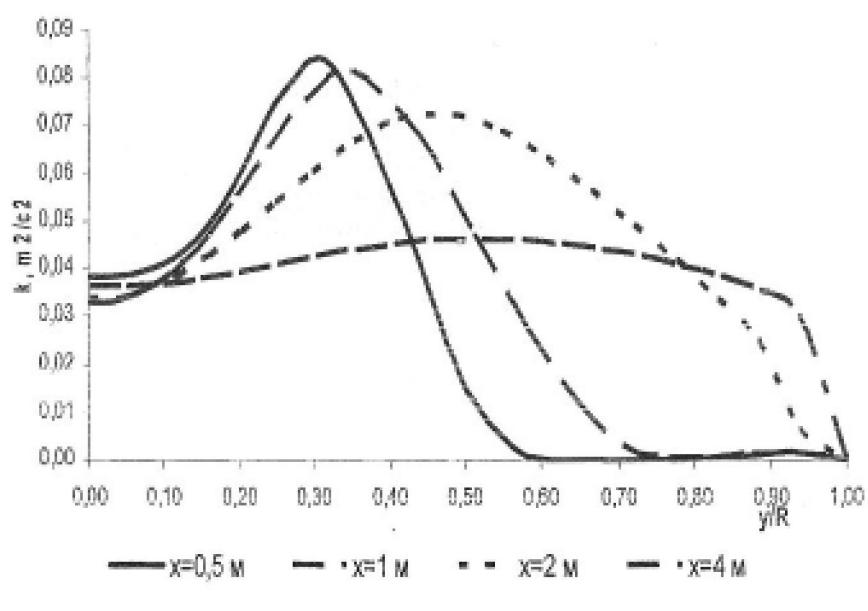


Рис. 6. Распределение кинетической энергии турбулентности при $T_u = 10\%$



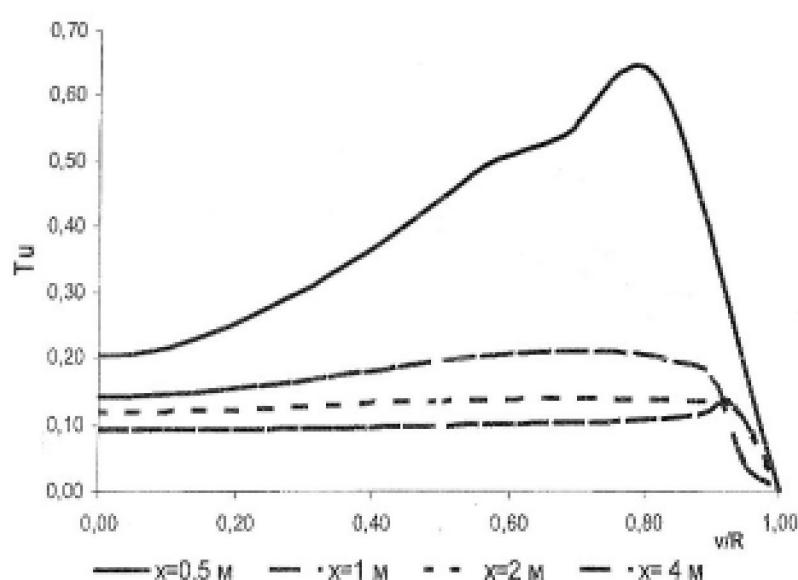


Рис. 7. Распределение уровня турбулентности при $Tu = 18\%$

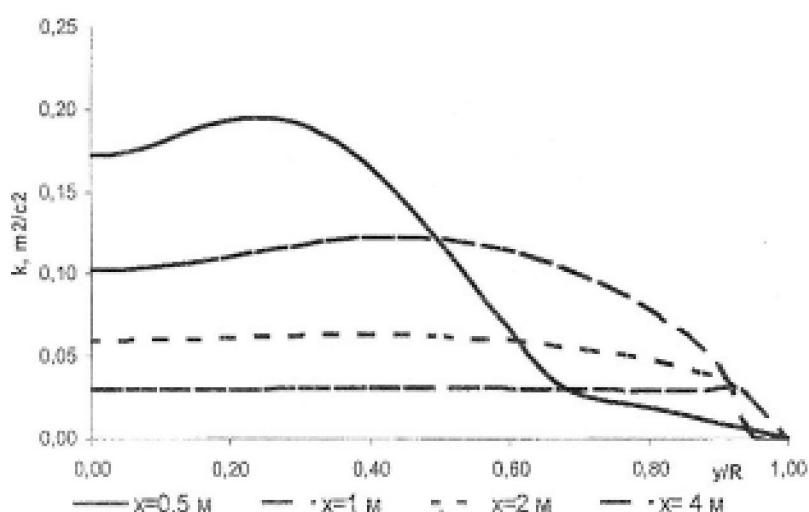


Рис. 8. Распределение кинетической энергии турбулентности при $Tu = 18\%$

относительных пульсаций у стенок камеры сгорания. Объясняется это тем, что хотя абсолютные пульсации у поверхности небольшие, но и средняя скорость у поверхности очень мала, поэтому отношение этих величин достигает больших значений. При $Tu_0 = 18\%$ распределение уровня турбулентности имеет один максимум возле стенки, так как фронт пламени в этом случае практически отсутствует.

Все полученные результаты согласуются с данными аналогичного исследования для горения свободной турбулентной струи метана [7].

ЛИТЕРАТУРА

1. Турбулентные течения реагирующих газов / Под ред. П. Либби, Ф. Вильямса. М.: Мир, 1983. 325 с.
2. Вулис Л.А., Еришн Ш.А., Ярин Л.П. Основы теории газового факела. Л: Энергия, 1968. 202 с.
3. Вулис Л.А., Ярин Л.П. Аэродинамика факела. Л: Энергия, 1978. 216 с.
4. Гиневский А.С., Почкина К.А. Влияние начальной турбулентности потока на характеристики асимметричной затопленной струи // ИФЖ. 1977. № 1. С. 15-20.
5. Lockwood F.C., Naguib A.S. The prediction of the fluctuations in the properties of free, round-jet, turbulent, diffusion flames // Combustion and flame. 1975. N 24. P. 109-124.
6. Тышканбаева М.Б. Численное моделирование эффектов неравновесности в реагирующим турбулентном пограничном слое // Автореф. дис. канд. физ.-мат. н. Алматы, 1982. 23 с.
7. Аскарова А.С., Болегенова С.А., Локтионова И.В. Химически реагирующие турбулентные газовые струи при наличии внешних воздействий. Алматы: Қазақ университеті, 2005. 29 с.
8. Петухов Б.С., Поляков А.Ф. Теплообмен при смешанной турбулентной конвекции. М.: Наука, 1986.
9. Аскарова А.С., Локтионова И.В., Болегенова С.А., Лаврищева Е.И. Горение струи метана в условиях повышенной начальной турбулентности // Вестник КазГУ. Сер.

Физическая. 2002. № 2(13). С. 101-107.

10. Аскарова А.С., Ибрагимова Г.А., Локтионова И.В.
Моделирование горения газов в вертикальной камере сго-
рания // Труды 4-й Междунар. науч. конф. «Современные
достижения физики и фундаментальное физическое обра-
зование». Алматы, октябрь 2005. С. 7.

Резюме

Жазық жану камерасында метанның турбулентті
жануы жайлы есептің сандық шешімі алынып, диффу-

зиялық алаудың орташаланған және пульсациялық
сипаттамаларына көтеру күші мен бастапқы турбу-
ленттіліктің көтерінкі деңгейінің әсері зерттелді.

Summary

The numerical solution of the problem of turbulent
combustion of methane in the flat burner has been obtained.
The influence of lift force and the initial level of turbulence on
the averaged, pulsation characteristics of the diffusion torch
has been researched.

КазНУ им. аль-Фараби,
г. Алматы

Поступила 14.06.2010г.