

# ТЕПЛОФИЗИКА

## ВЛИЯНИЕ ПОДЪЕМНОЙ СИЛЫ НА ГОРЕНИЕ МЕТАНА В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ

С.А. Болегенова

НИИЭТФ, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г. Алматы

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 реакции с процессами переноса и конвекцией. 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].

Реагирующие течения являются сжимаемыми, так как плотность зависит от температуры и молярной массы смеси, которые сильно изменяются в процессе горения. Так температура во вронте 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).

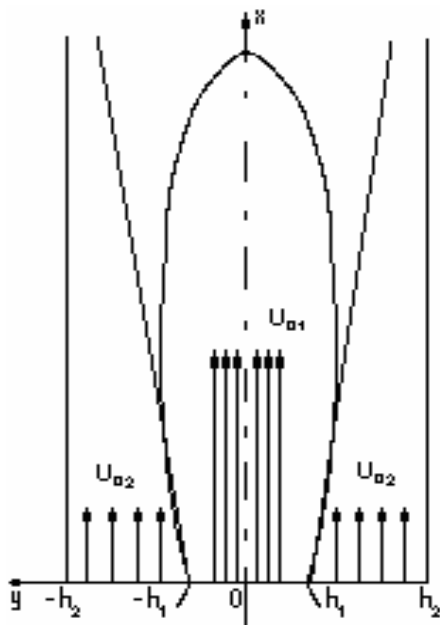


Рис. 1. Схема течения

В работе [2-3] рассматривается задача о диффузионном горении турбулентной струи метана вдоль оси прямоугольного канала в спутном потоке окислителя. Схема задачи представлена на рисунке 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 такие промежуточные продукты реакции, как  $CH_3$ ,  $OH$ ,  $CO$ ,  $H$ ,  $O$ ,  $C$  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.

В качестве окислителя используется воздух, при этом считается, что он состоит только из кислорода (23,2%) и азота (76,8%). Азот присутствует в качестве разбавителя и в реакции не участвует;

– обобщенную реакцию горения метана можно записать следующим уравнением:



Здесь метан ( $CH_4$ ) -топливо, кислород ( $O_2$ )- окислитель, углекислый газ ( $CO_2$ ) и вода ( $H_2O$ ) - продукты реакции, азот ( $N_2$ ) - инертный разбавитель.

Система уравнений будет иметь следующий вид [4]:

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0. \quad (2)$$

Уравнение движения:

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_{эф} \frac{\partial u}{\partial y} \right) + (\rho - \rho^*) g_x. \quad (3)$$

Уравнение энергии:

$$\rho u c_p \frac{\partial T}{\partial x} + \rho v c_p \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + Q_w. \quad (4)$$

Уравнение переноса для концентраций всех компонент смеси:

$$\rho u \frac{\partial c_i}{\partial x} + \rho v \frac{\partial c_i}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \rho D_1 \frac{\partial c_i}{\partial y} \right) \pm w_i; \quad (5)$$

$$w = \rho^2 k_0 c_1^\alpha c_2^\beta e^{-\frac{E}{RT}},$$

Уравнение переноса для концентраций всех компонент смеси:

$$\rho u \frac{\partial c_i}{\partial x} + \rho v \frac{\partial c_i}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \rho D_1 \frac{\partial c_i}{\partial y} \right) \pm w_i; \quad (6)$$

$$w = \rho^2 k_0 c_1^\alpha c_2^\beta e^{-\frac{E}{RT}},$$

Было исследовано влияние подъемной силы на диффузионный турбулентный факел в плоском канале. Численное решение получено с учетом и без учета подъемной силы. На рисунке 2 приведена форма факела для этих двух случаев.

Из этого рисунка видно, что учет подъемной силы приводит к тому, что факел становится намного короче и шире. Возможно, это связано с тем, что подъемная сила приводит к турбулизации течения. Так как скорость горения диффузионного факела

лимитируется скоростью перемешивания топлива и окислителя на границе струи, то чем больше пульсации, тем быстрее происходит это перемешивание, а следовательно топливо будет сгорать быстрее.

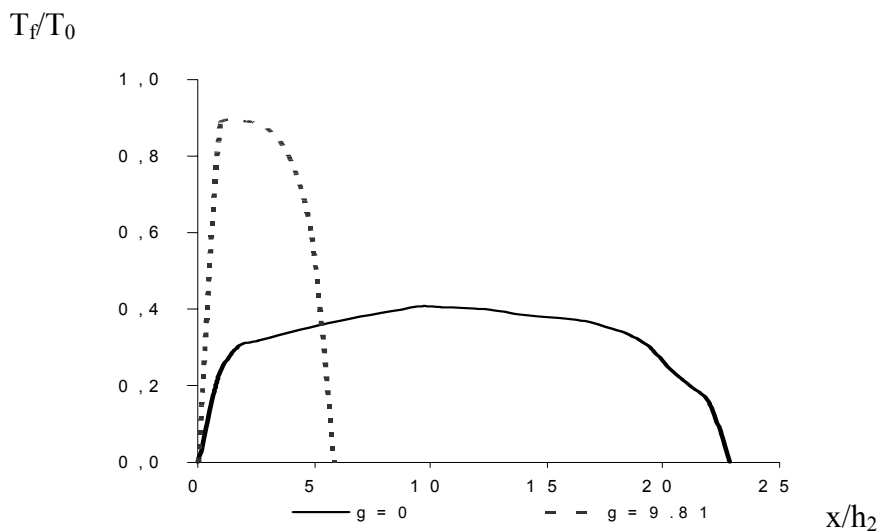


Рис. 2. Форма факела

Для подтверждения этого предположения, были построены графики распределения пульсаций скорости и корреляций пульсаций скорости и температуры, которые приведены на рисунках 3, 4.

Пульсации скорости с учетом естественной конвекции намного больше, чем в ее отсутствие, что подтверждает наше предположение о турбулизации течения. Корреляции пульсаций скорости и температуры в количественном отношении отличаются не очень сильно, но максимумы пульсаций находятся в различных частях канала в соответствии с положением фронта пламени.

Положение фронта пламени определяется по максимуму осредненной температуры, распределение которой приведено на рисунке 5. В случае, когда подъемная сила не учитывается, факел более узкий, и фронт пламени находится ближе к оси канала. Факел с учетом подъемной силы настолько расширяется, что фронт пламени приближается к стенкам канала.

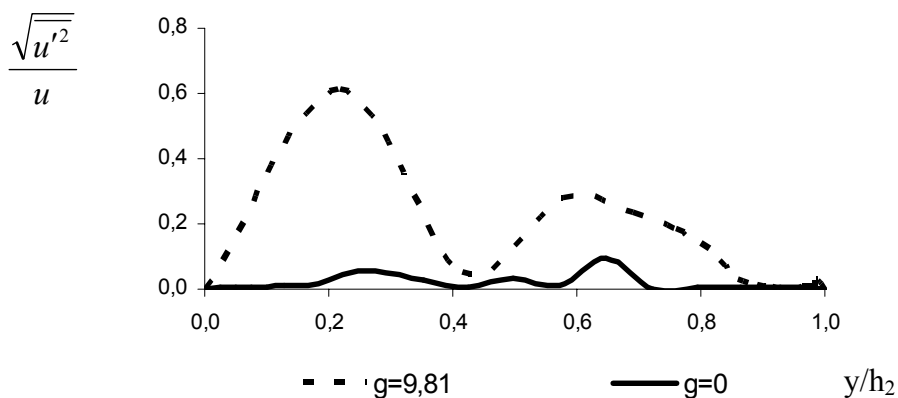


Рис.3. Распределение продольных пульсаций скорости поперек канала при  $x/h=0,9$

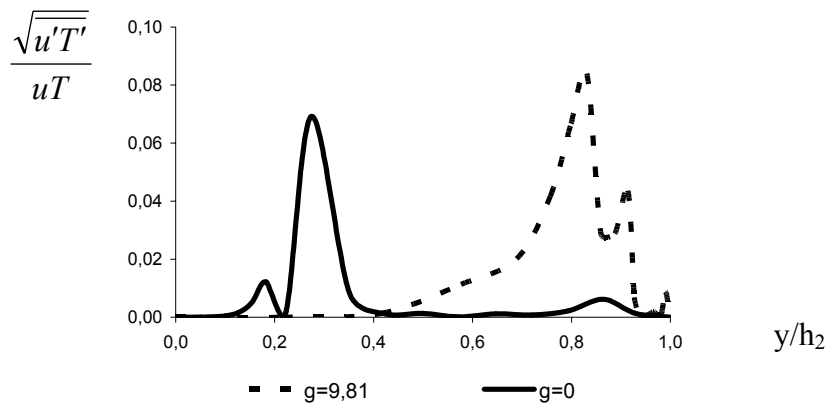


Рис.4. Распределение корреляций пульсаций скорости и температуры поперек канала при  $x/h=0,9$

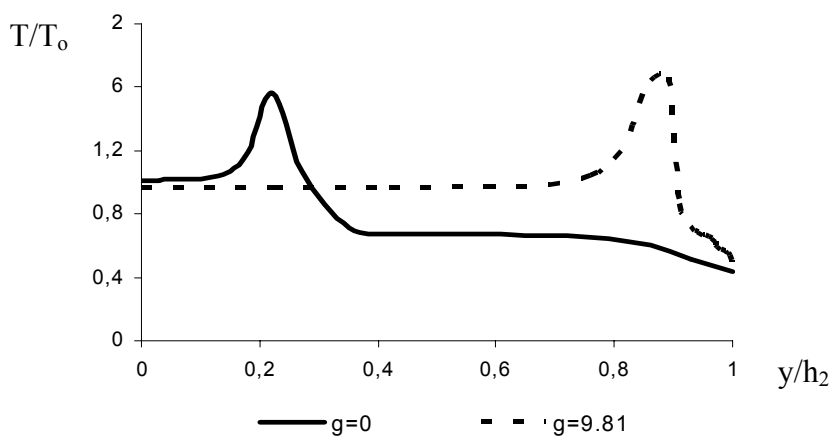


Рис.5. Распределение осредненной температуры поперек канала при  $x/h=0,9$

Соответственно и максимумы пульсаций  $u'T'$  в первом случае смещены к центру канала, а во втором случае – к стенкам. При этом во фронте пламени  $u'T'$  имеют минимум, а максимумы соответствуют градиентам температуры.

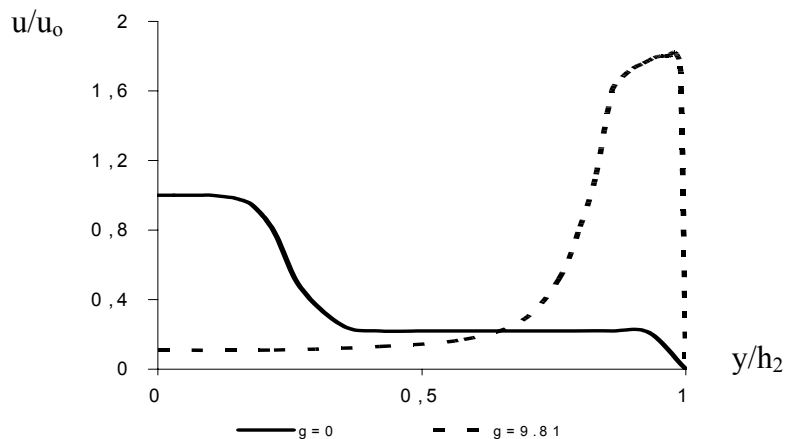


Рис. 6. Распределение осредненной скорости поперек канала при  $x/h=0,9$

Относительные пульсации скорости (рисунок 3) не так однозначно зависят от распределения осредненных скоростей, приведенных на рисунке 6. Это объясняется сложным характером зависимости относительных пульсаций скорости от кинетической энергии турбулентности, скорости ее диссипации, а также от градиента средней скорости и корреляций продольной и поперечной пульсаций скорости.

Из рисунка 6 также видно, что в отсутствие подъемной силы максимум скорости находится на оси канала, а «ступенька» в распределении скорости соответствует различию в начальных скоростях топлива и окислителя. Когда подъемная сила присутствует, происходит качественное изменение профиля скорости: максимум скорости находится во фронте пламени около стенки. Очевидно, это происходит из-за того, что в области фронта пламени имеется наибольший градиент плотности, так как температура во фронте горения максимальная, а на стенке – минимальная. Следовательно, наибольшее влияние подъемной силы наблюдается именно в этой части канала, что приводит к ускорению течения.

Изменение максимальной скорости и температуры вдоль канала приведено на рисунках 7, 8. Из рисунка 7 следует, что подъемная сила оказывает очень сильное влияние на эти характеристики. При  $g=0$  максимальная скорость практически не меняется, а при  $g \neq 0$  течение ускоряется более, чем в 2 раза на протяжении факела. После того, как горение заканчивается, скорость резко падает.

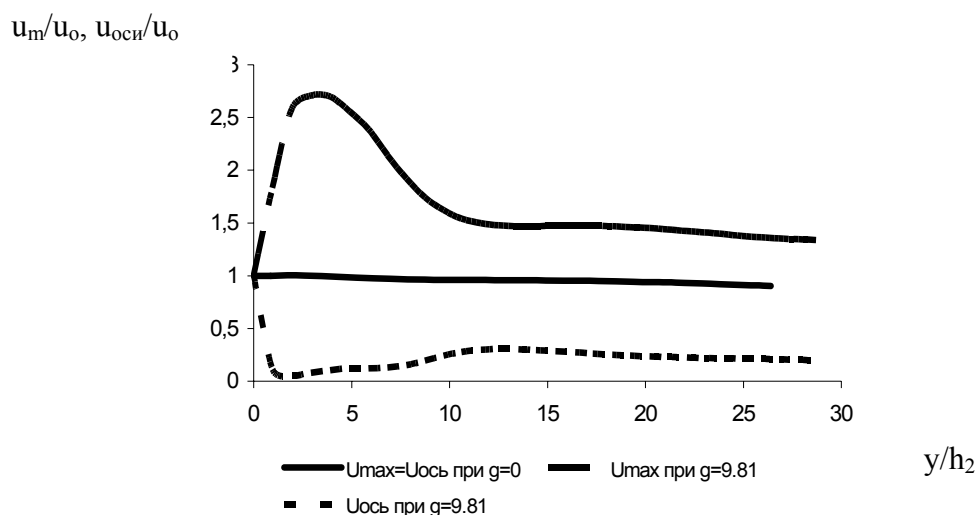


Рис. 7. Изменение максимальной скорости и скорости на оси канала

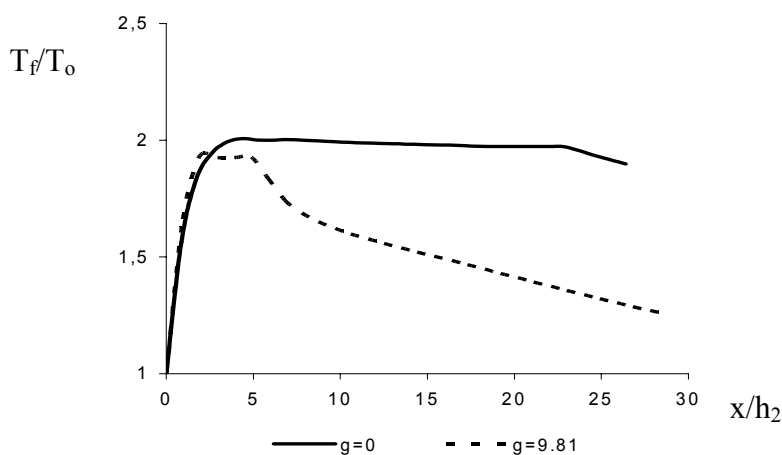


Рис. 8. Изменение температуры во фронте пламени вдоль канала

Максимальная температура во фронте пламени, приведенная на рисунке 8, не сильно зависит от учета подъемной силы и остается практически постоянной на всем протяжении факела. По окончании горения в обоих случаях температура падает.

#### **Литература**

1 Турбулентные течения реагирующих газов / Под ред. П.Либби, Ф.Вильямса. М.: Мир, 1983. -325 с.

2 Аскарлова А.С., Болегенова С.А., Локтионова И.В. Химически реагирующие турбулентные газовые струи при наличии внешних воздействий // Алматы:Қазақ университеті, 2005.-29 с.

3 Петухов Б.С., Поляков А.Ф. Теплообмен при смешанной турбулентной конвекции. М.: Наука, 1986.

4 Аскарлова А.С., Ибрагимова Г.А., Локтионова И.В. Моделирование горения газов в вертикальной камере сгорания // Труды 4-й Международной научной конференции “Современные достижения физики и фундаментальное физическое образование”. - Алматы, октябрь 2005. – с.7.

### **КӨТЕРУ КҮШІНІҢ ЖАНУ КАМЕРАСЫНДАҒЫ МЕТАННЫҢ ЖАНУЫНА ӘСЕРІ**

**С.А. Болегенова**

Жазық жану камерасында метанның турбулентті жануы жайлы есептің сандық шешімі алынып, диффузиялық алаудың орташаланған және пульсациялық сипаттамаларына көтеру күші мен бастапқы турбуленттіліктің көтеріңкі деңгейінің әсері зерттелді.

### **INFLUENCE OF LIFT FORCE ON METHANE BURNING IN THE COMBUSTION CHAMBER**

**S.A. Bolegenova**

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.