

О ВЛИЯНИИ МОДЕЛИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ И ПУЛЬСАЦИЙ КОНЦЕНТРАЦИЙ КОМПОНЕНТ ГАЗОВОЙ СМЕСИ НА РАСЧЕТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ТЕЧЕНИЯ ПРИ ГОРЕНИИ УГЛЕВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА В СПУТНОМ ПОТОКЕ ВОЗДУХА В КАНАЛЕ

В рамках модели «узкого канала» рассмотрена задача о кинетическом горении дозвуковой струи пропана, истекающей в спутный дозвуковой поток воздуха в канале. Кинетика горения пропана в воздухе описывается одностадийной стехиометрической брутто-реакцией. Моделирование пульсаций концентраций компонент неравновесной газовой смеси выполнено с использованием алгебраической модели. Численно исследовано влияние выбора модели турбулентности и пульсаций концентраций компонент на развитие процесса горения.

В межах моделі «вузького каналу» розглянуто задачу про кінетичне горіння дозвукового струменя пропану, що витікає в супутний дозвуковий потік повітря в каналі. Кінетика горіння пропану в повітрі описується одностадійною стехіометричною брутто-реакцією. Моделювання пульсацій концентрацій компонентів нерівноважної газової суміші проведено з використанням алгебраїчної моделі. Чисельно досліджено вплив вибору моделі турбулентності та пульсацій концентрацій компонентів на розвиток процесу горіння.

In the frame of the narrow channel model the problem on a kinetic combustion of a subsonic propane jet flowing out in a subsonic concurrent air flow through channel is considered. The air-combustion kinetics is described by the one-stage stoichiometric gross-reaction. Simulation of pulsations of component concentrations of a nonequilibrium gas mixture is done using an algebraic model. The effects of selection of the model for turbulence and pulsations of component concentrations on the combustion evolution are numerically studied.

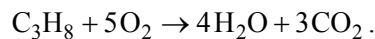
Экспериментальная отработка высокотемпературных неравновесных термогазодинамических процессов, широко распространенных в различных технических устройствах, требует значительных материальных, временных затрат и наличия современной экспериментальной базы. Численное моделирование в сочетании с экспериментальными исследованиями позволяет значительно сократить материальные и временные затраты. Использование для численного моделирования внутренних неравновесных струйных течений полной системы уравнений Навье–Стокса неизбежно связано с большим объемом вычислений и предъявляет весьма высокие требования к быстродействию и объему оперативной памяти современных ЭВМ. Поэтому применение приближенных моделей в тех случаях, когда принятые при построении модели допущения выполняются, является более целесообразным, чем применение полных уравнений Навье–Стокса. При численном моделировании внутренних течений на базе упрощенных уравнений Навье–Стокса в настоящее время широко используются модели «узкого канала» и параболизированные уравнения Навье–Стокса [1]. Особенностью модели «узкого канала» является то, что она позволяет проводить расчет как дозвуковых, так и сверхзвуковых течений при условии постоянства статического давления в поперечном направлении. Последнее обстоятельство значительно сужает диапазон применимости данной модели при расчете сверхзвуковых течений.

В большинстве работ, посвященных расчету горения газовых смесей, не учитывается влияние турбулентных пульсаций температуры и концентраций компонент на осредненные значения источниковых членов в уравнениях диффузии. Это допущение справедливо, когда время химических реакций меньше временных масштабов турбулентных пульсаций. Примером такого течения является горение хорошо перемешанной смеси. В случае «медленных» химических реакций влияние пульсаций температуры и концентраций компонент на значения источниковых членов может быть весомым, напри-

мер в случае неперемешанной смеси. Поэтому пульсации температуры и концентраций должны быть учтены в процессе расчета.

Целью данной статьи является исследование влияния пульсаций концентраций компонент неравновесной газовой смеси и используемой модели турбулентности на расчетные параметры процесса горения турбулентной дозвуковой струи пропана в спутном потоке воздуха в осесимметричном канале.

Математическая постановка задачи и алгоритм ее решения. Рассматривается задача о горении расчетной дозвуковой струи пропана, истекающей в спутный дозвуковой поток воздуха в осесимметричном канале постоянного поперечного сечения. Исследуются два типа воспламенения: первый – самовоспламенение при взаимодействии холодной струи с горячим спутным потоком; второй – принудительное воспламенение в результате поджига газовой смеси в области смешения холодной струи и потока. Во втором случае компоненты струи и воздух в спутном потоке подаются при температуре $T_a = T_e = 295$ К и давлении $p = 1$ бар, а поджиг смеси осуществляется в некотором сечении x_{podz} , которое располагается в потоке на высоте кромки сопла. В случае самовоспламенения спутный поток имеет температуру $T_e = 700$ К. В качестве кинетической модели горения углеводородного топлива (пропана C_3H_8) в кислороде воздуха используется простейшая кинетическая модель, включающая сложную одностадийную реакцию, описываемую стехиометрической брутто-формулой [2, 3]



Расходы воздуха и горючего определяются исходя из условия, что в начальном сечении канала $\alpha_0 > 1$, где α_0 – степень избытка окислителя, равная отношению массы воздуха, подаваемого в начальном сечении, к массе воздуха, соответствующей стехиометрии, при заданных параметрах течения во входном сечении.

Задача решается в рамках модели стационарных уравнений «узкого канала» в постановке [2]. Расчетная область представляет собой начальный участок осесимметричного канала радиусом y_w и длиной L . На нижней границе области – оси симметрии канала, задаются условия симметрии. На верхней границе – стенке канала, задаются: условия прилипания для компонент вектора скорости; условие тепловой изоляции для статической энтальпии или температуры и условия отсутствия потока вещества i -го компонента. В начальном сечении задаются распределения значений всех газодинамических параметров.

Для расчета характеристик турбулентности используются дифференциальные однопараметрические модели турбулентности « $v_t - 90$ » [4] и SALSA [5], позволяющие учесть влияние пограничного слоя, образующегося на внутренних стенках канала, на характеристики процесса смешения и горения.

Для учета турбулентных пульсаций концентраций компонент на параметры течения неравновесной газовой смеси использован подход, предложенный в [6, 7]. Согласно этому подходу, скорости химических реакций r_i , вычисляемые по осредненным значениям концентраций и температуры, заменяются выражениями $\tilde{r}_i = k_i r_i$, где $k_i = 1 - \Delta t_i$ ($0 \leq k_i \leq 1$) – доли времени, в течение которого в рассматриваемой точке присутствует моль подготовлен-

ной смеси; коэффициент k_i можно рассматривать как вероятность возникновения благоприятных условий для протекания i -ой химической реакции. Долью времени Δt , в течение которого химическая реакция прекращается из-за того, что окислитель и горючее присутствуют порознь, можно определить из соотношения $\Delta t = \Delta t_{ox} + \Delta t_{fu}$, где Δt_{ox} , Δt_{fu} – доли времени, в течение которых локальные концентрации соответственно воздуха или горючего равны 0. Значения Δt_k ($k = ox$ или $k = fu$) можно выразить через характеристики λ_k , равные отношению среднеквадратичных пульсационных составляющих (дисперсий) концентраций $\overline{C_k'^2}$ к квадрату осредненных составляющих $\lambda_k = \overline{C_k'^2} / \overline{C_k}^2$

$$\Delta t_k = \max\left(0, \frac{\lambda_k - c}{\lambda_k + 1}\right),$$

где c – эмпирическая константа; $c = 1/3$ для пилообразного профиля; $c = 0,233$ для синусоидального профиля [7].

При рассмотрении струйных течений для определения дисперсий концентраций можно воспользоваться простейшей алгебраической моделью, вытекающей из гипотезы пути перемешивания Прандтля

$$\overline{C_k'^2} = A l_p^2 \left(\frac{\partial \overline{C_k}}{\partial y} \right)^2, \quad (1)$$

где l_p – длина пути перемешивания Прандтля; A – эмпирическая константа. В соответствии с различными литературными источниками, для величины A можно получить значения, различающиеся в 1,5 – 2 раза. Согласно [7], положим $A = 1,75$.

В [7] рассматривается горение пристенной струи водорода в сверхзвуковом потоке. При расчете параметров течения используется алгебраическая двухслойная модель турбулентности Себеси–Смита и длина пути смешения определяется в соответствии с этой моделью (как параметр этой модели) внутри пограничного слоя. В настоящей работе процесс горения происходит внутри области смешения вблизи оси канала, поэтому предлагается определять величину l_p исходя из имеющегося (полученного в результате расчета) поля турбулентной вязкости. В соответствии с гипотезой пути перемешивания Прандтля [8]

$$\nu_t = l_p^2 \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right|, \quad (2)$$

где u – продольная скорость; ν_t – кинематический коэффициент турбулентной вязкости.

Перейдем в (2) к безразмерным переменным и выразим l_p :

$$\bar{l}_p = \sqrt{\frac{\bar{\nu}_t}{\text{Re}_m \left| \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right|}}, \quad (3)$$

где Re_m – характерное число Рейнольдса.

Влияние модели турбулентности. Большинство из широко применяемых в настоящее время дифференциальных моделей турбулентности созданы для моделирования турбулентных течений без химического взаимодействия. Поэтому использовать их для расчета неравновесных течений следует с большой осторожностью. Кроме вычислительных трудностей, возникающих при моделировании турбулентных течений с протеканием химических реакций, возникает вопрос об адекватном отражении поведения турбулентной вязкости при использовании той или иной модели турбулентности при горении неравновесной газовой смеси.

С целью исследования влияния модели турбулентности на расчетные газодинамические параметры течения неравновесной газовой смеси были выбраны две однопараметрические дифференциальные модели турбулентности « $\nu_t - 90$ » и SALSA, как достаточно универсальные и не очень сложные в реализации. Эти модели широко применяются при расчетах различных внутренних течений без горения, а последняя из них рекомендована для расчета течений в диффузорах, воздухозаборниках и газодинамических трактах [9].

Расчеты проведены при следующих значениях определяющих параметров в начальном сечении осесимметричного канала:

- скорость струи $u_a = 25$ м/с;
- массовый состав струи $C_{C_3H_8} = 0,2$; $C_{N_2} = 0,8$;
- статическая температура струи $T_a = 295$ К;
- скорость спутного потока $u_e = 100$ м/с;
- массовый состав спутного потока $C_{O_2} = 0,23$, $C_{N_2} = 0,77$;
- статическая температура спутного потока $T_e = 700$ К;
- статическое давление в струе и в спутном потоке $p = 1$ бар;
- радиус сопла, отнесенный к радиусу канала $y_a / y_w = 0,3$;
- безразмерный коэффициент турбулентной вязкости, равный отношению кинематических коэффициентов турбулентной и ламинарной вязкости $\bar{\nu}_{t0} = \nu_t / \nu_{lam} = 10$;
- характерное число Рейнольдса $\text{Re}_m = 10^4$;
- относительная толщина пограничного слоя $\bar{\delta} = \delta / y_w = 0,1$;
- коэффициент избытка окислителя в начальном сечении $\alpha_0 = 5,2$.

В случае подачи разогретого воздуха в спутном потоке после небольшого участка смешения наступает самовоспламенение газовой смеси. На рис. 1 – 2 показано, как влияет использование модели турбулентности « $\nu_t - 90$ » или SALSA на расчетные газодинамические характеристики потока. Кривые, помеченные значками Δ , \blacktriangle , соответствуют расчетам с использованием дифференциальной модели турбулентности « $\nu_t - 90$ », а кривые со значками \circ , \bullet соответствуют модели турбулентности SALSA. Значения функций на оси ка-

нала обозначены Δ и \circ , а значения функций на стенке канала обозначены \blacktriangle и \bullet . На рис. 1 а – е представлены распределения статического давления, турбулентной вязкости, массовых концентраций пропана, кислорода и углекислого газа и статической температуры на оси и на стенке канала, соответственно. Процесс горения начинается в области смешения, где достигается близкое к стехиометрическому соотношению горючего и окислителя, и статическая температура превышает температуру воспламенения пропана. Из рис. 1 а видно, что это происходит при $\bar{x} = x/y_w > 4$ (резкое падение давления). При расчете с использованием модели SALSA воспламенение наступает несколько раньше, но процесс горения протекает менее интенсивно (об этом можно судить по углу наклона кривой давления). На рис. 1 б показаны расчетные распределения турбулентной кинематической вязкости вдоль оси канала. Имеет место заметное отличие в характере поведения представленных кривых. При использовании модели турбулентности « $v_t - 90$ » генерируются более высокие значения турбулентности как в области смешения до воспламенения, так и на участке горения, что приводит к более быстрому выгоранию горючего.

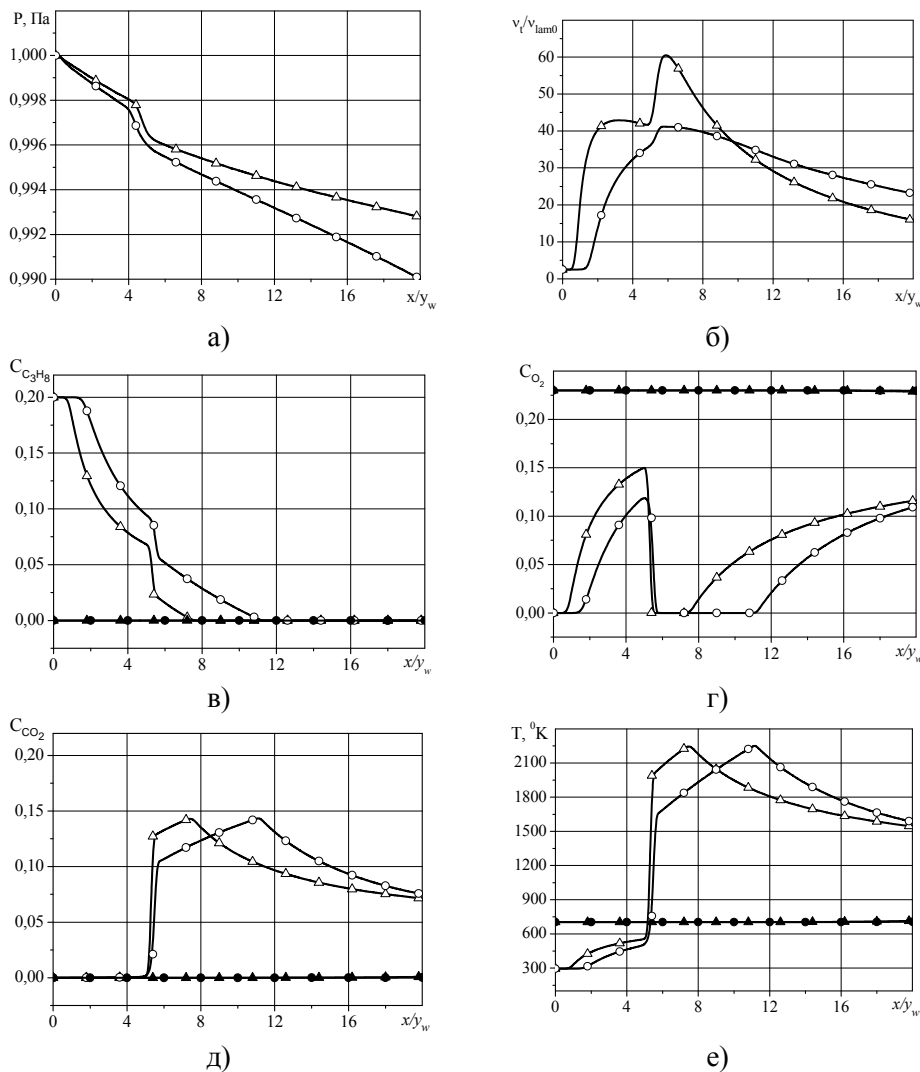


Рис. 1

Когда область горения достигает оси канала (это происходит при $\bar{x} > 5$), вследствие химических реакций происходит резкое уменьшение концентраций горючего и окислителя (рис. 1 в, г), а также рост концентраций продуктов реакции и температуры (рис. 1 д, е). На всех представленных графиках распределения газодинамических параметров на стенке канала остается неизменным, т.к. область смещения на рассматриваемом участке канала длиной $\bar{L} = L/y_w = 20$ не достигает его стенки.

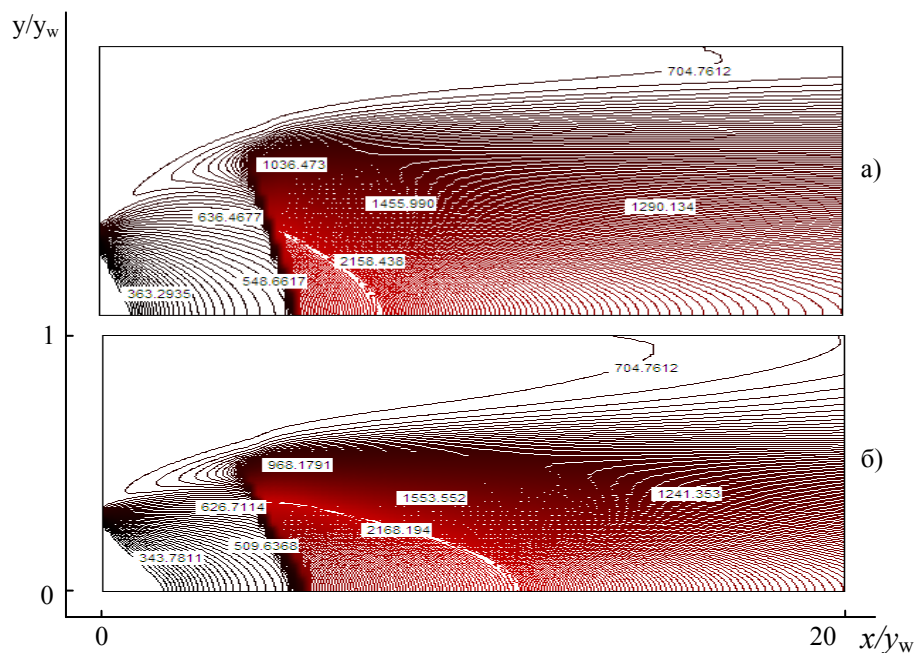


Рис. 2

На рис. 2 а, б представлены изолинии поля статической температуры. При использовании модели « $v_t - 90$ » начало воспламенения сдвигается вниз по потоку, при этом процесс горения протекает более интенсивно, область горения имеет меньшую протяженность по продольной координате (рис. 2 а). При использовании модели турбулентности SALSA воспламенение смеси начинается раньше, но область горения является более узкой в поперечном направлении и более растянутой в продольном направлении (рис. 2 б). Следовательно, использование при расчете течения модели турбулентности « $v_t - 90$ » приводит к более интенсивному горению турбулентной газовой смеси.

Из полученных результатов можно сделать вывод, что использование рассмотренных моделей турбулентности приводит к различному поведению турбулентной вязкости при горении. Это в большей или меньшей степени оказывает влияние на все остальные газодинамические характеристики течения. Больше всего выбор модели турбулентности оказывает влияние на задержку воспламенения, интенсивность процесса горения и размеры области горения. Выбор той или иной модели турбулентности при расчете турбулентных неравновесных течений должен основываться на результатах сравнения с экспериментальными данными. Следует отметить, что для расчетов турбулентных течений в диффузорах без химических реакций в [9] рекомендована модель турбулентности SALSA, в [10] показано, что результаты расчетов по модели « $v_t - 90$ » хорошо согласуются с соответствующими результатами,

полученными с использованием модели турбулентности SALSA. Все дальнейшие исследования получены с использованием модели « $v_t - 90$ », как более простой при численной реализации.

Влияние пульсаций концентраций неравновесной газовой смеси на параметры течения. При вычислении пульсаций концентраций в соответствии с формулой (1) в качестве масштаба турбулентности l_p выбиралось либо локальное значение масштаба турбулентности l_{pj} , определяемое в каждом j -том узле расчетной сетки в текущем маршевом сечении по формуле (3), либо использовалось среднерасходное значение масштаба турбулентности

$$l_{p\text{mdl}} = \int_0^{y_w} \rho u u^v l_{pj} dy / \int_0^{y_w} \rho u u^v dy \text{ в текущем маршевом сечении.}$$

Параметрические расчеты по исследованию влияния пульсаций концентраций выполнены при прежних значениях определяющих параметров течения в начальном сечении. Рассмотрены случаи подачи разогретого воздуха в спутном потоке ($T_e = 700$ К) и подачи воздуха и горючего при нормальных условиях ($T_a = 295$ К, $T_e = 295$ К, $p = 1$ бар).

На рис. 3 – 4 представлены результаты расчетов струи пропана в спутном потоке воздуха при температуре $T_e = 700$ К с учетом и без учета пульсаций концентраций. Кривые со значками \blacktriangle соответствуют расчету неравновесного течения в квазиламинарном приближении; кривые, помеченные значками \circ и \bullet , получены при расчете с учетом пульсаций концентраций с использованием локального и среднерасходного значения масштаба турбулентности соответственно. На рис. 3 показано влияние пульсаций концентраций на распределение статического давления P (рис. 3 а) и массовую концентрацию пропана на оси канала $C_{C_3H_8}$ (рис. 3 б). Из представленных графиков видно, что пульсации концентраций компонентов неравновесной газовой смеси приводят к задержке воспламенения горючего. Если в квазиламинарном приближении горение начинается при $\bar{x} > 4$, то при расчете с пульсациями концентраций воспламенение происходит при $\bar{x} > 11$ (рис. 3 а). Об окончании горения можно судить по графикам, представленным на рис 3 б. В первом случае полное выгорание горючего наступило при $\bar{x} \approx 8$, во втором – при $\bar{x} \approx 13$ и $\bar{x} \approx 14$ соответственно расчету с локальным и среднерасходным масштабом турбулентности. Как уже было сказано, воспламенение начинается в области смешения, при этом происходит резкое выделение тепла и падение давления, поэтому о начале воспламенения удобно судить по графику распределения давления. Затем интенсивность горения определяется скоростью поступления окислителя в зону горения. Догорание происходит на оси канала, о чем свидетельствует смещение максимума температуры в расчетах к оси канала. Это подтверждается распределением концентрации пропана на оси канала (рис. 3 б). После выгорания горючего происходит постепенное выравнивание параметров по сечению канала.

На рисунках 4 а, б представлены профили статической температуры в сечениях начала воспламенения (при $\bar{x} = 4$ и $\bar{x} = 11$ соответственно) без учета и с учетом пульсаций концентраций. Обозначения кривых такие же, как на рис. 3. Параметры течения при $\bar{x} = 4$ (рис. 4 а) соответствуют началу воспламенения при расчете течения без пульсаций концентраций компонентов и

участку задержки воспламенения при расчете с учетом пульсаций концентраций. Использование локального значения масштаба турбулентности l_{pj} на участке задержки воспламенения приводит к незначительному затягиванию процесса воспламенения по сравнению с расчетом со среднерасходным значением l_{pmdl} (рис. 4 а). Однако после воспламенения учет пульсаций концентраций через локальный масштаб турбулентности l_{pj} приводит к интенсификации процесса горения (рис. 4 б) и уменьшению зоны горения в продольном и поперечном направлениях (рис. 3 б).

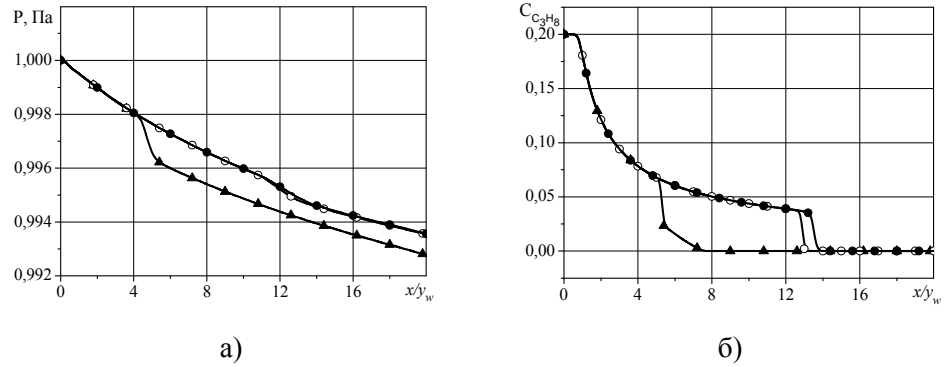


Рис. 3

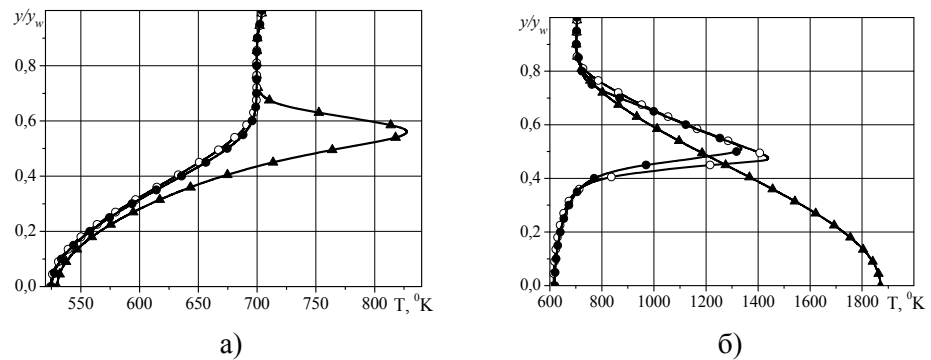


Рис. 4

Из анализа полученных результатов можно сделать вывод, что при расчете неравновесного течения с учетом турбулентных пульсаций концентраций максимальная температура в потоке ниже, чем при расчете в квазиламинарном приближении. Кроме того, наблюдается задержка воспламенения горючего. Процесс горения начинается позже, но при этом протяженность области горения уменьшается, что связано со смещением начала воспламенения вниз по потоку и увеличением массовой доли подготовленной смеси.

Из представленных результатов видно, что учет пульсаций концентраций оказывает значительное влияние на параметры течения на участке воспламенения и горения неравновесной газовой смеси. Учет пульсаций концентраций приводит к задержке воспламенения, уменьшению протяженности области горения и интенсивности горения.

В случае подачи воздуха и горючего при нормальных условиях самовоспламенения смеси не происходит. Для иницирования процесса горения ис-

пользуется принудительное воспламенение (поджиг), которое осуществляется в потоке на высоте кромки сопла при $\bar{x} = \bar{x}_{podz} = 2$ [2]. На рис. 5 а – г показано влияние пульсаций концентраций на распределения продольной скорости, турбулентной вязкости, массовой концентрации пропана и статической температуры вдоль оси канала, соответственно. Обозначения графиков те же, что на рис. 3.

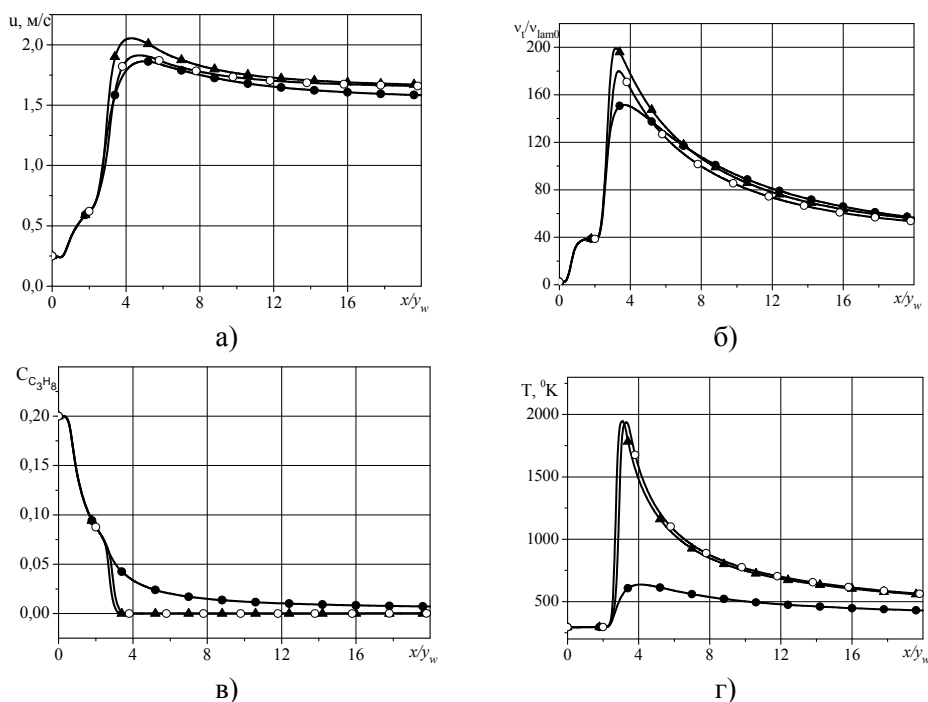


Рис. 5

Во всех рассмотренных случаях в области воспламенения смеси наблюдается сильный рост турбулентной вязкости (рис. 5 б). Это сопровождается ростом скорости (рис. 5 а) и падением давления. При моделировании пульсаций концентраций через локальное значение масштаба турбулентности l_{pij} наблюдается незначительная задержка воспламенения топлива. Моделирование пульсаций концентраций через среднерасходное значение масштаба турбулентности приводит в расчетах к неполному сгоранию топлива (рис. 5 в) и, соответственно, меньшему выделению тепла, уменьшению статической температуры в потоке (рис. 5 д) и концентраций продуктов реакций.

Из анализа проведенных исследований можно сделать вывод, что учет турбулентных пульсаций приводит к снижению статической температуры и концентраций продуктов реакций, неполноте сгорания топлива и, кроме того, может приводить к сильному росту турбулентной вязкости вследствие неоднородности поля массовых концентраций компонент неравновесной газовой смеси.

Выводы. Рассмотренные дифференциальные однопараметрические модели турбулентности « $v_t - 90$ » и SALSA позволяют описывать течение турбулентной неравновесной газовой смеси. Использование той или иной модели турбулентности оказывает заметное влияние на интенсивность процесса

горения при моделировании течений с протеканием химических реакций. Выбор соответствующей модели турбулентности при расчете турбулентных неравновесных течений должен основываться на результатах сравнения с экспериментальными данными.

В результате проведенных исследований было выяснено, что учет пульсаций концентраций компонент неравновесной газовой смеси оказывает значительное влияние на параметры течения на участке воспламенения и горения. Это приводит к задержке воспламенения, уменьшению интенсивности и протяженности области горения. При определенных соотношениях параметров пульсации концентраций могут приводить к затуханию процесса горения и неполному сгоранию топлива.

Обнаружена тесная взаимосвязь пульсаций концентраций и поведения турбулентной вязкости. При расчете турбулентных неравновесных течений необходимо обращать особое внимание на моделирование турбулентности, поскольку поведение турбулентной вязкости оказывает значительное влияние на интенсивность процесса горения.

1. *Лапин Ю. В.* Внутренние течения газовых смесей / *Ю. В. Лапин, М. Х. Стрелец*. – М. : Наука. – 1989. – 368 с.
2. *Тимошенко В. И.* К вопросу интенсификации горения углеводородного топлива в спутном потоке воздуха / *В. И. Тимошенко, А. Е. Дешко, И. С. Белоцерковец* // *Техническая механика*. – 2010. – № 3. – С. 71 – 80.
3. Физико-химические процессы в газовой динамике. Справочник. Том 2. Физико-химическая кинетика и термодинамика / Под ред. *Г. Г. Черного и С. А. Лосева*. – М. : Научно-издательский центр механики. – 2002. – 368 с.
4. *Гуляев А. Н.* К созданию универсальной однопараметрической модели турбулентной вязкости / *А. Н. Гуляев, В. Е. Козлов, А. Н. Секундов* // *МЖГ*. – 1993. – №4. – С. 69 – 81.
5. Restatement of the Spalart-Allmaras eddy-viscosity model in strain-adaptive formulation / *T. Rung, U. Bunge, M. Schatz, F. Thiele* // *AIAA Journal*. – 2003. – Vol. 41, N 7. – P. 1396 – 1399.
6. *Колесников О. М.* Влияние пульсаций концентраций на воспламенение пристенной струи водорода в сверхзвуковом потоке / *О. М. Колесников* // *Физика горения и взрыва*. – 1985. – Т. 21, № 1. – С. 53 – 58.
7. *Колесников О. М.* Влияние неперемешанности в больших вихревых структурах на воспламенение и горение турбулентных струй горючего в сверхзвуковом потоке / *О. М. Колесников* // *Физика горения и взрыва*. – 2006. – Т. 42, № 1. – С. 49 – 56.
8. *Лойцянский Л. Г.* Механика жидкости и газа / *Л. Г. Лойцянский*. – М. : Наука. Гл. ред. физ-мат. лит. – 1987. – 840 с.
9. *Мингазов Б. Г.* Выбор моделей турбулентности и параметров сетки для расчета течений в диффузорных каналах / *Б. Г. Мингазов, И. С. Давлетшин* // *Изв. вузов. Авиационная техника*. – 2011. – № 4. – С. 24 – 28.
10. *Тимошенко В. И.* Торможение сверхзвукового потока в канале при распределенном подводе массы / *В. И. Тимошенко, И. С. Белоцерковец, Н. В. Гурылева* // *Техническая механика*. – 2012. – № 3. – С. 23 – 34.

Институт технической механики
НАН Украины и НКА Украины,
Днепропетровск

Получено 11.10.2012,
в окончательном варианте 07.11.2012.