

УДК 621.983.044:621.7.044

**С.А. МАЗНИЧЕНКО, С.И. ПЛАНКОВСКИЙ, О.С. БОРИСОВА**

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

## **ОБ ОСОБЕННОСТЯХ СМЕСЕОБРАЗОВАНИЯ В ТЕПЛОВЫХ ПРИВОДАХ ИМПУЛЬСНОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

Рассмотрены недостатки современных систем смесеобразования в камерах импульсных машин. Предложена математическая модель процесса наполнения камер сгорания компонентами топливной смеси. На основе моделирования показано, что применяемые способы наполнения не обеспечивают равномерного состава смеси внутри камеры перед зажиганием. Сформулированы задачи совершенствования систем смесеобразования импульсного оборудования.

**импульсное оборудование, система смесеобразования, моделирование процесса наполнения**

### **Введение**

Импульсное оборудование разработки ХАИ позволяет с высокой эффективностью осуществлять целый ряд технологических процессов в производстве авиационно-космической техники – разделение и объемную штамповку труднодеформируемых сталей и сплавов, термоимпульсную очистку деталей произвольной формы. Однако следует признать, что импульсное оборудование не получило широкого применения. В какой-то мере это связано с недостатками, свойственными созданным образцам. К таким недостаткам следует отнести недостаточную точность дозирования энергии, что приводит к повышенным нагрузкам на конструктивные элементы оборудования и технологической оснастки.

Для термоимпульсных технологий качество обработки определяется еще и стабильностью теплового воздействия по всей поверхности обрабатываемой детали. Отсюда возникает необходимость обеспечения равномерного состава топливной смеси во всем объеме камеры.

В случае обработки деталей авиационных агрегатов, имеющих сложную форму с множеством отверстий различного диаметра, обеспечение равномерности состава топливной смеси становится достаточно сложной задачей.

Решение этой задачи возможно за счет проведения численных экспериментов на базе современных математических моделей. Вопросам построения таких моделей для задач смесеобразования в камерах сгорания импульсного оборудования посвящена настоящая статья.

### **1. Сущность проблемы**

В настоящее время в камерах сгорания (КС) тепловых приводов импульсных устройств, предназначенных для выполнения различных операций обработки материалов давлением и потоками энергии высокой плотности, в качестве энергоносителя используют смеси углеводородного топлива – природного (метана) или искусственного (типа пропан-бутановых соединений) газов с воздухом в стехиометрическом соотношении [1]. В целях эксплуатационной безопасности при формировании заряда применяется схема с внутренним смесеобразованием. В полость КС сначала впускают газ с заданным уровнем давления, а затем сжатый воздух, кислород которого служит окислителем. Соотношение (по давлению) количества газа и воздуха в смеси выбирают так, чтобы выдерживался ее стехиометрический состав.

Природный газ легче воздуха, а пропан-бутан – тяжелее, и это вынуждает принимать в процессе

дозирования компонентов специальные меры с целью максимальной турбулентности смеси, чтобы получить ее гомогенный состав.

Как установлено в процессе исследований и длительной промышленной эксплуатации, принятые конструктивные и эксплуатационные меры в целом удовлетворительно решают задачи смесеобразования. Однако энергетическая нестабильность образованных топливоздушных зарядов (при неизменных внешних и внутренних параметрах, а также давлении компонентов в смеси) свидетельствует о существенных неравномерностях в их составе по объему КС. Причиной этого является неудовлетворительное смешение при раздельном дозировании, а также разница в плотностях газообразных топлив и сжатого воздуха, которая обуславливает местные расслоения и появление зон со значительными отклонениями от стехиометрического состава [2].

Отличающиеся плотности компонентов накладывают также технологические ограничения на операции подготовки рабочего цикла. Так, например, использование пропан-бутановых соединений в смесях с номинальным давлением, превышающим 1,2...1,3 МПа, даже при температуре окружающей среды не менее 15...20°C весьма проблематично, поскольку при таком давлении в конце процесса дозирования пропан-бутан начинает сжижаться, резко изменяя этим состав смеси, вплоть до невозможности ее воспламенения. В метановоздушных смесях весьма ограничено время между окончанием дозирования и воспламенением. Экспериментально установлено, что, во-первых, смесь должна стабилизироваться, на что расходуется до 0,2 с, а во-вторых, по истечении 0,4...0,5 с развивается процесс расслоения компонентов. Поэтому поджог смеси, как показывает практика, следует выполнять не ранее 0,15...0,2 с и не позже 0,3...0,35 с после окончания выпуска воздуха при раздельном дозировании газообразного топлива и окислителя.

Изложенные особенности, характерные поведе-

нию топливоздушных смесей на основе углеводородных газообразных топлив, оказывают существенное влияние на стабильность теплоэнергетических преобразований в течение каждого цикла. Непостоянство величины выделяющейся энергии в идентичных рабочих циклах негативно сказывается на выполнении конкретных технологических операций.

Поэтому задача стабильного обеспечения заданного состава топливной смеси является одним из основных направлений совершенствования импульсного оборудования. Данная задача может быть решена на основе использования современных численных методов, что требует разработки соответствующих математических моделей. Решению этой задачи посвящена настоящая статья.

## 2. Математическая модель процесса смесеобразования

В целях совершенствования привода импульсного оборудования в ХАИ разработана математическая модель процесса смесеобразования при раздельном наполнении двухкомпонентной топливной смесью. Для численного исследования поставленной задачи используются система уравнений Навье – Стокса [3], включающих законы сохранения массы, импульса и энергии нестационарного пространственного течения в рамках подхода Эйлера в декартовой системе координат  $(x_i, i = 1, 2, 3)$ , в общем виде:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k) = 0,$$

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_i u_k - \tau_{ik}) + \frac{\partial P}{\partial x_i} = S_i,$$

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} ((\rho E + P)u_k + q_k - \tau_{ik}u_i) = S_k u_k + Q_H,$$

где  $t$  – время;

$u$  – скорость газа;

$\rho$  – плотность газа;

$P$  – давление газа;

$S_i$  – внешние массовые силы, действующие на единичную массу газа;

$E$  – полная энергия единичной массы газа;

$Q_H$  – тепло, выделяемое тепловым источником в единичном объеме газа;

$\tau_{ik}$  – тензор вязких сдвиговых напряжений;

$q_i$  – диффузионный тепловой поток, нижние индексы означают суммирование по трем координатным направлениям.

Кроме того, используются уравнения состояния инертного газа

$$\rho = P/(RT),$$

где  $R$  – газовая постоянная моделируемого газа, а также эмпирические зависимости вязкости и теплопроводности этого газа от температуры.

Для моделирования турбулентных течений уравнения Навье-Стокса осредняются по Рейнольдсу.

В результате уравнения имеют дополнительные члены – напряжения по Рейнольдсу, а для замыкания этой системы уравнений используются уравнения переноса кинетической энергии турбулентности и ее диссипации в рамках  $k$ – $\varepsilon$  модели турбулентности [3].

Тензор вязких сдвиговых напряжений определяется следующим образом:

$$\tau_{ij} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij},$$

где  $\mu = \mu_l + \mu_t$ ;

$\mu_l$  – коэффициент динамической вязкости;

$\mu_t$  – коэффициент турбулентной вязкости;

$\delta_{ij}$  – дельта-функция Кронекера;

$k$  – кинетическая энергия турбулентности.

В соответствии с  $k$ – $\varepsilon$  моделью турбулентности,  $\mu_t$  определяется через величины кинетической энергии турбулентности  $k$  и диссипации этой энергии  $\varepsilon$ :

$$\mu_t = f_\mu \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon},$$

$$\text{где } f_\mu = \left[ 1 - \exp(-0,025 R_y) \right]^2 \cdot \left( 1 + \frac{20,5}{R_T} \right);$$

$$R_T = \frac{\rho k^2}{\mu_l \varepsilon};$$

$$R_y = \frac{\rho \sqrt{k} y}{\mu_l};$$

$y$  – расстояние от поверхности стенки;

$$C_\mu = 0,09.$$

Кинетическая энергия турбулентности  $k$  и диссипация этой энергии  $\varepsilon$  определяются в результате решения следующих двух уравнений:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k k) = \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \left( \mu_l + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_k} \right) + S_k;$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \left( \mu_l + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k} \right) + S_\varepsilon,$$

$$\text{где } S_k = \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon + \mu_t P_B;$$

$$S_\varepsilon = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \left( f_1 \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \mu_t C_B P_B \right) - C_{\varepsilon 2} f_2 \frac{\rho \varepsilon^2}{k};$$

$$\tau_{ij}^R = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij};$$

$$P_B = - \frac{g_i}{\sigma_B} \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_i};$$

$g_i$  – составляющая гравитационного ускорения в координатном направлении  $x_i$ ;

$$\sigma_B = 0,9;$$

$$C_B = 1 \text{ при } P_B > 0, C_B = 0 \text{ при } P_B < 0;$$

$$f_1 = 1 + \left( \frac{0,05}{f_\mu} \right)^3;$$

$$f_2 = 1 - \exp\left(-R_T^2\right);$$

$$C_{\varepsilon 1} = 1,44; C_{\varepsilon 2} = 1,92; \sigma_\varepsilon = 1,3; \sigma_k = 1.$$

В случае наполнения камеры сгорания импульсных машин имеет место двух- (водород-кислород) или многокомпонентное (метан-воздух) течение газов. В этом случае изменение концентраций компонентов смеси в пространстве вследствие диффузии моделируется следующими уравнениями:

$$\frac{\partial \rho y_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k y_i) = \frac{\partial}{\partial x_k} \left( (D_{ij} + D_{ij}^t) \frac{\partial y_i}{\partial x_k} \right);$$

где  $y_i$  – концентрация  $i$ -го компонента смеси;

$D_{ij}$  и  $D_{ij}^t$  – коэффициенты молекулярной и турбулентной диффузии, которые подчиняются закону Фика, так что  $D_{ij} = D \delta_{ij}$ ,  $D_{ij}^t = \delta_{ij} \frac{\mu_t}{\sigma}$ , где  $D$  – коэффициент диффузии;

$\sigma$  – турбулентное число Шмидта.

Для определения теплофизических свойств текущей среды, т.е. зависимостей плотности, вязкости, теплопроводности, удельных теплоемкостей, коэффициентов диффузии компонентов текущей среды от давления, температуры и концентрации компонентов текущей среды, используются уравнения состояния, эмпирические и полуэмпирические зависимости.

Адекватность описанной модели подтверждена сравнением результатов численного эксперимента с аналитическими решениями ряда аналогичных задач. Расхождение результатов между численным и точным решениями не превышает 3,5 % [4]. Полная система уравнений решалась методом конечных объемов при помощи пакета COSMOS FloWorks.

### 3. Результаты моделирования процесса наполнения и их обсуждение

В процессе проведения численных экспериментов на основе описанной выше математической модели рассматривались процессы смесеобразования в камере установки для термоимпульсной обработки с размещенной внутри камеры деталью.

В качестве топливной смеси рассматривалась

смесь метана и воздуха. Время наполнения камеры смесью метана и воздуха происходит за 3 характерных этапа:

1.  $t = 0 - 0,12$  с – время наполнения камеры метаном;
2.  $t = 0,12 - 1,0$  с – время выдержки;
3.  $t = 1,0 - 1,06$  с – время наполнения камеры воздухом.

Признаком завершения этапа наполнения для каждого из компонентов смеси служит заданный уровень давления, рассчитанный исходя из необходимой энергии и стехиометрического соотношения.

На первом этапе расчетов с целью проверки адекватности моделей анализировались зависимости от времени средних по объему камеры характеристик – температуры, давления и массовых концентраций компонентов смеси.

Изменение средней массовой концентрации метана (пунктирная линия) и воздуха (сплошная линия) в зависимости от времени наполнения камеры приведено на рис. 1.

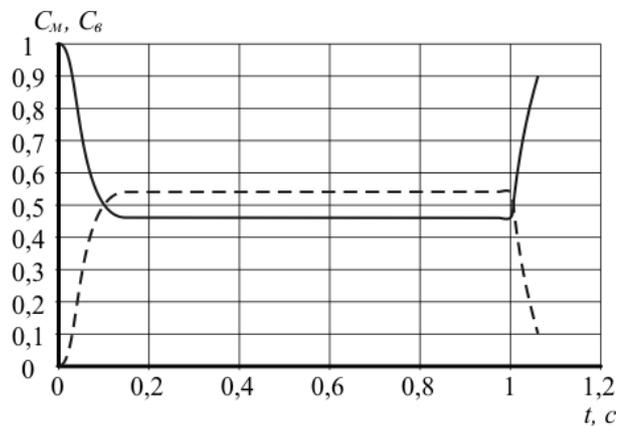


Рис. 1. Изменение средней массовой концентрации метана и воздуха по времени наполнения

Сумма средней концентрации метана  $C_m$  и средней концентрации воздуха  $C_a$  в любой промежуток времени равна 1. В соответствии с этим при подаче метана в КС его массовая концентрация растет, а воздуха падает, во время выдержки массовая концентрация обоих элементов не меняется, а при подаче воздуха его массовая концентрация растет, а

метана падает. Для рассматриваемого случая (объем камеры  $0,04 \text{ м}^3$ , магистральное давление метана  $0,3 \text{ МПа}$ , давление метана в камере  $0,276695 \text{ МПа}$ ) средняя температура по окончании процесса наполнения метаном в камере повышается с  $293$  до  $350 \text{ К}$ .

В процессе выдержки перед подачей воздуха средняя температура в камере падает до уровня  $340 \text{ К}$ . При последующей подаче воздуха смесь в камере сжимается и ее средняя температура повышается до  $420 \text{ К}$ .

Характер зависимостей от времени наполнения средних значений температуры, давления массовых концентраций компонентов смеси, полученный в результате моделирования, совпадает с решениями, полученными в ранее выполненных работах теоретически и в результате экспериментальных измерений [1, 2], что подтверждает адекватность построенной математической модели.

Наиболее интересные результаты были получены при анализе распределения температуры и массовой концентрации компонентов по объему КС. Установлено, что в процессе наполнения распределение массовой концентрации метана в камере, а также температура смеси являются крайне неравномерными.

На рис. 2 показана картина распределения концентрации метана в камере в момент окончания процесса наполнения для рассмотренного в ходе моделирования примера.

Видно, что воздух, подававшийся в КС, вытеснил метан и в верхнюю ее часть из областей, находящихся напротив впускного клапана. Непосредственно в этой зоне вблизи обрабатываемой детали метан вообще практически отсутствует. Максимальная массовая концентрация метана превосходит минимальное значение более чем в  $1000$  раз. При этом график средней концентрации дает значение массового содержания метана, равное стехиометрическому –  $0,1$ !

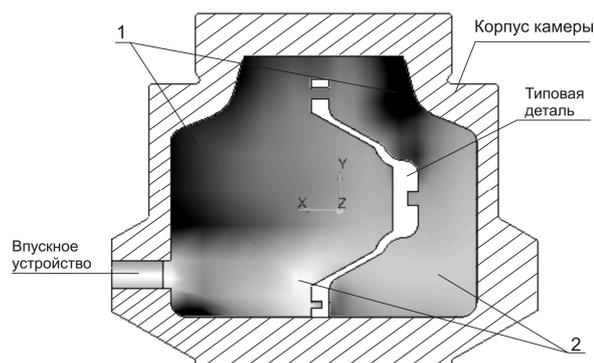


Рис. 2. Распределение массовой концентрации метана в камере в момент окончания наполнения: 1, 2 – области с максимальной и минимальной массовой концентрацией метана соответственно

Аналогичная картина наблюдается в распределении температур в объеме камеры. В момент окончания наполнения КС метаном разброс температур составляет от  $285 \text{ К}$  (т.е. имеются области с локальным охлаждением) до  $392 \text{ К}$ . Этому же моменту времени соответствует средняя температура  $350 \text{ К}$ .

В процессе выдержки температура в КС выравнивается по объему. Минимальная температура в камере составляет  $320 \text{ К}$ , максимальная –  $347 \text{ К}$ . Однако к моменту окончания наполнения КС воздухом максимальное значение температуры составляет более  $483 \text{ К}$ . В то же время, непосредственно вблизи впускного отверстия наблюдается минимальная температура – менее  $273 \text{ К}$ .

Очевидно, что в данном случае говорить о наличии топливной смеси равномерного состава нельзя. В случае термоимпульсной обработки детали подобные предположения неизбежно приведут к неправильному расчету технологических параметров процесса. Изменениями направления подачи газа или способа размещения детали в камере проблема не решается. Таким образом, результаты моделирования убедительно показывают необходимость совершенствования процессов смесеобразования при проектировании технологических процессов термоимпульсной обработки.

Дополнительную погрешность в дозирование компонентов топливной смеси вносят используемые

системы текущего измерения параметров дозирования [5]. Они, как правило, содержат трубопроводы значительной длины, что в совокупности с продолжительностью времени установления показаний (запаздывание) представляет собой весьма несовершенную систему, требующую довольно тонкой регулировки при наладке. Несоблюдение соотношения количеств топлива и окислителя при раздельной их подаче в к.с. привода также вызывает колебание величины располагаемой энергии цикла от номинальной. Это неблагоприятно влияет на течение технологического процесса импульсной обработки.

Поэтому весьма актуальным является создание более современной системы дозирования, способной с максимальной точностью, обеспечиваемой современными средствами автоматизации и микропроцессорной техники, отмеривать строго нормированное количество топливовоздушной смеси и выдерживать при этом оптимальное соотношение компонентов при весьма малой длительности процесса дозирования, которое для различных технологических процессов импульсной обработки практически не должно выходить за пределы 2...5 с.

#### 4. Пути совершенствования систем наполнения КС импульсного оборудования

Существующий способ формирования заряда энергоносителя на основе раздельной последовательной подачи компонентов можно значительно усовершенствовать, заменив его наполнением КС привода готовой смесью. Для этого впускное устройство необходимо оснастить специальным смесителем, в котором при прохождении воздушного потока (компонентом с большим магистральным давлением) захватывается необходимое количество горючего газа. При этом состав смеси (соотношение топлива и окислителя) задается при наладке системы с помощью регулировочных элементов: игл, клапанов, заслонок и т.п.

Преимущества подобной системы очевидны. Впуск смеси содержит всего одну фазу, степень перемешивания компонентов, т.е. гомогенность смеси является наиболее высокой и сгорание такой газовой среды более эффективно.

Применение в АСУ микропроцессорных приборов и основанных на их использовании специализированных вычислителей, электронных контроллеров позволяет улучшить работу системы дозирования и, в частности, исключить цепи текущего измерения давления смеси в КС привода и связанные с этим погрешности. Так, например, располагая законом нарастания давления смеси по времени в виде  $P_{см} = f(\tau)$  для конкретной КС и системы дозирования, несложно исходное давление смеси задавать длительностью наполнения. Указанную зависимость легко получить при наладочных работах, записывая в память компьютера показания эталонного датчика давления, размещенного непосредственно на КС энергоузла, с одновременной фиксацией временных отметок.

Поскольку каждое счетное микропроцессорное устройство снабжено встроенным тактовым генератором с высокой стабильностью генерируемой частоты, то можно отсчитывать любые заданные отрезки времени с точностью до микросекунд по числу тактовых импульсов, характеризующих требуемый уровень давления смеси в процессе наполнения камеры сгорания, причем отсчет будет выполнен стабильно, от цикла к циклу.

Мощность единичного цикла (давление смеси) может задавать оператор, либо система управления в автоматическом режиме, базируясь на показаниях соответствующих датчиков, и с учетом данных, введенных заблаговременно в АСУ, о свойствах обрабатываемого материала и характеристиках технологического процесса обработки.

«Безошибочность» работы подобной системы дозирования зависит только от состояния впускного тракта, которое, как свидетельствует опыт много-

летней эксплуатации, сохраняется неизменным весьма долго при условии отсутствия механического вмешательства (местные текущие переделки, случайные деформации, повреждения и т.п., после ликвидации которых следует записать повторно зависимость  $P_{см} = f(\tau)$ ).

Следует также отметить, что при наличии некоторой негерметичности уплотнения «металл-металл» в камерах сгорания, снабженных запирающе-перепускным устройством, и отдельной подаче компонентов, часть топливного газа в течение наполнения воздухом выдавливается из камеры и качественный состав смеси существенно нарушается. При наполнении камеры готовой смесью соотношение количеств топлива и окислителя сохраняется неизменным, а может измениться только общая количественная характеристика, которую легко корректировать, изменяя (увеличивая) длительность подачи смеси в полость камеры сгорания. Эту операцию также можно автоматизировать, базируясь на изменении (уменьшении при наличии утечки) скорости нарастания давления смеси, что может быть предусмотрено программным обеспечением АСУ.

### Заключение

Разработана нестационарная трехмерная математическая модель на основе уравнений Навье-Стокса и  $k-\varepsilon$  модели турбулентности для описания процесса смесеобразования в камерах сгорания импульсного оборудования.

Показано, что при традиционной схеме последовательного наполнения камеры компонентами топливной смеси ее состав крайне неравномерен в объеме камеры. Поэтому принимавшееся ранее предположение о равномерном составе смеси в камерах

сгорания импульсных машин является неверным.

Предложены направления совершенствования систем наполнения импульсного оборудования за счет внедрения схемы совместного наполнения компонентами смеси и перехода к заданию потребной энергии привода длительностью наполнения.

### Литература

1. Кононенко В.Г., Астафьев Л.Я., Стельмах В.А. Анализ параметров энергоузлов импульсных машин для обработки металлов давлением // Обработка материалов давлением в машиностроении. – Х.: ХГУ, 1969. – Вып. 4. – С. 75-81.
2. Стриженко В.Е., Саранча В.Н., Хуако А.М. Исследование процесса смесеобразования в камерах сгорания импульсных машин // Высокоскоростная обработка материалов давлением. – Х.: ХАИ, 1975. – Вып. 4. – С. 115-119.
3. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1973. – 847 с.
4. Газодинамічні характеристики потоку інертного газу в каналі плазмотрону / В.С. Кривцов, С.І. Планковський, Є.В. Цегельник, Є.К. Островський, А.О. Таран // Наукові вісті НТУУ «Київський політехнічний інститут». – 2006. – № 2. – С. 87-99.
5. Импульсная резка горячего металла / В.С. Кривцов, А.Ю. Боташев, А.Н. Застела, С.А. Мазниченко, С.И. Планковский, В.Н. Сапрыкин. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т „Харьк. авиац. ин-т”, 2005. – 476 с.

Поступила в редакцию 5.09.2007

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.П. Божко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Харьков.