

Моделирование термоимпульсной обработки с учетом неоднородности топливной смеси

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского "ХАИ"

Предложены математические модели для расчета теплового воздействия на деталь при термоимпульсной обработке с учетом неравномерности фракционного состава топливной смеси. Модель учитывает конечную, зависящую от температуры, скорость химических реакций при горении, процессы теплообмена конвекцией и излучением. Для моделирования теплообмена при турбулентных течениях использована SST модель турбулентности. Достоверность результатов моделирования подтверждена сравнением численных данных с результатами экспериментальных измерений. Показано, что неоднородность топливной смеси оказывает существенное влияние на режимы термоимпульсной обработки деталей сложной геометрической формы.

Ключевые слова: термоимпульсная машина, неоднородность топливной смеси, горение в камере, математическое моделирование.

Введение

Проблема технологической очистки высокоточных деталей и механизмов, имеющих пары трения, актуальна для всего машиностроения. При обеспечении чистоты поверхностей деталей и рабочих полостей многих машин их ресурс может быть увеличен в два – три раза. Поэтому интерес к отделочно-очистным технологиям в высокоразвитых в промышленном отношении странах не ослабевает на протяжении последних 20 лет.

Технологические загрязнения неизбежно образуются во время изготовления деталей, сборки, испытаний и эксплуатации изделий. При этом даже оптимизация режимов и применение инновационных способов обработки не может исключить образование микрозаусенцев на ребрах и микрочастиц на поверхности обрабатываемых деталей (рис.1) [1].

В мировом машиностроении используется более 100 способов финишной очистки деталей. Однако в последнее время наибольший интерес вызывают так называемые нетрадиционные способы, достоинством которых является возможность гибкой автоматизации процесса очистки – термоэнергетический, экструзионно-абразивный, электрохимический [2].

Технология термоимпульсного удаления заусенцев и очистки поверхности в наибольшей степени удовлетворяет условиям промышленного производства. Инструментом при этом является горючая газовая смесь, а очистка происходит при интенсивном тепловом воздействии продуктов сгорания на деталь. Однако при очистке этим методом тепловому воздействию подвергаются не только ликвиды, но и все остальные поверхности детали, что может приводить к изменениям в структуре материала. Поэтому необходимо обеспечить такие режимы обработки, при которых негативное воздействие тепла на деталь было бы минимальным.

Основным недостатком технологий термоимпульсной очистки на сегодня является необходимость проведения множества экспериментов для выбора технологических режимов. Это существенно увеличивает себестоимость обработки и сроки подготовки производства.

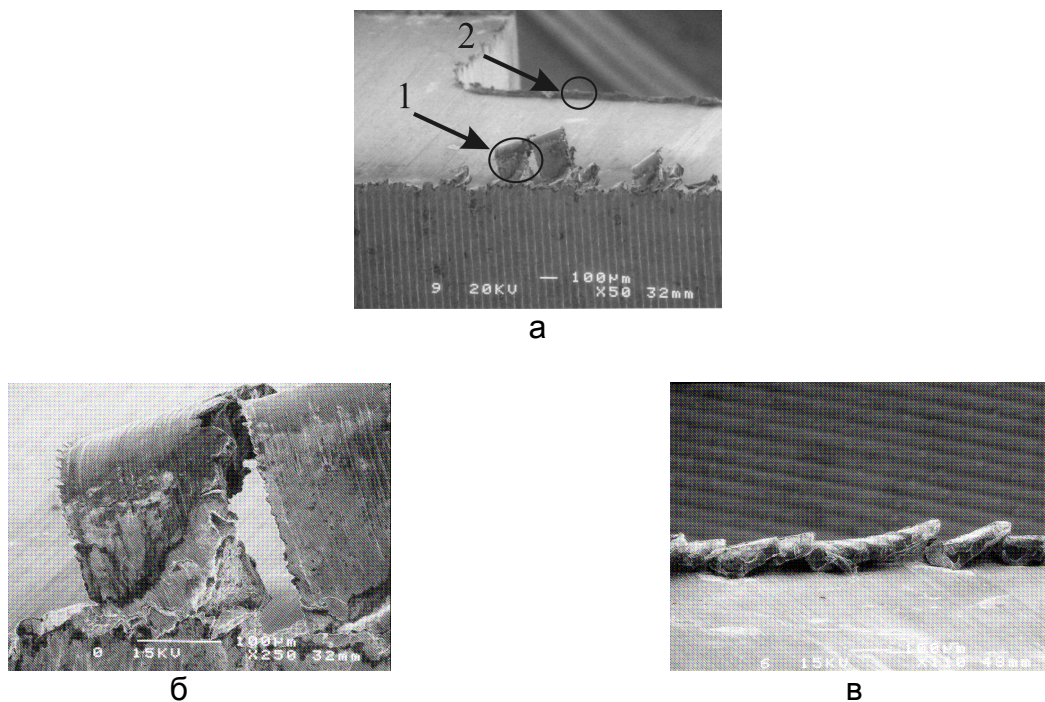


Рис.1. Заусенцы и микрозаусенцы на поверхности детали после высокоскоростного фрезерования: а – поверхность детали; б – заусенец (зона 1); в – микрозаусенцы (зона 2)

Полностью отказаться от проведения экспериментов при назначении технологических режимов термоимпульсной обработки невозможно, но необходимо сократить их количество до минимума. Это возможно при использовании методов численного моделирования. К настоящему времени существуют работы, посвященные моделированию смесеобразования в камерах термоимпульсных машин [3] и определению полей температур в обрабатываемых деталях [4]. Однако комплексные модели, учитывающие особенности смесеобразования, горения и теплопередачи при термоимпульсной обработке отсутствуют.

С учетом вышеизложенного задача разработки таких математических моделей с их интеграцией в современные CAD/CAE-системы, является актуальной. Целью настоящей работы является создание математических моделей процессов смесеобразования и последующего сгорания топливной смеси в камере термоимпульсной машины для определения температурных полей в деталях сложной формы и назначения режимов обработки.

Описание решаемой задачи и используемых математических моделей

Объектом исследования являются процессы смесеобразования, горения и теплообмена в камере термоимпульсной установки с помещенной в нее обрабатываемой деталью (рис.1). Камера сгорания термоимпульсной машины представляет собой замкнутый объем и имеет форму цилиндра. В корпусе камеры выполнено отверстие для подачи топливной смеси. Камера снабжена электрическими свечами для поджога смеси, управляемым клапаном для выпуска продуктов сгорания. Обрабатываемая деталь размещается на дне камеры сгорания или подвешивается в ней при помощи дополнительной технологической оснастки.

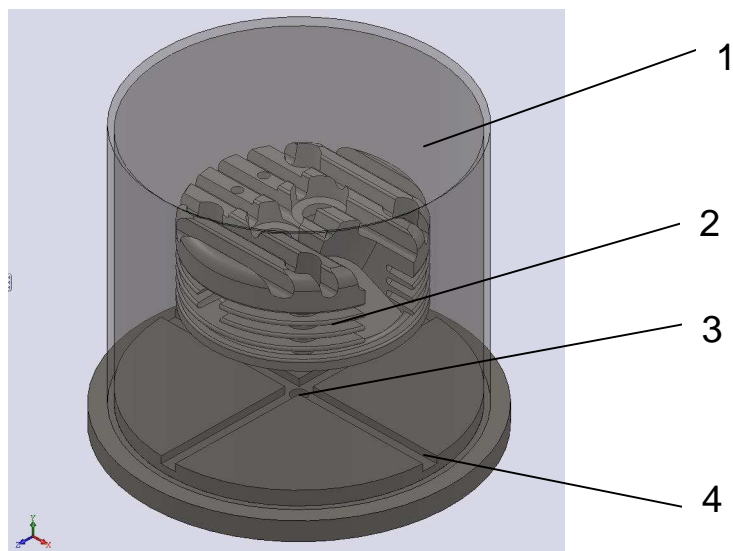


Рис. 2. Камера термоимпульсной машины с обрабатываемой деталью: 1 – корпус камеры; 2 – обрабатываемая деталь; 3 – отверстие для подачи смеси; 4 – паз

Рассматриваемая деталь имеет сложную форму с тонкими ребрами, сквозными и глухими отверстиями. В столе выполнены пазы, которые предотвращают перекрытие впускного отверстия деталью, при ее размещении на дне камеры. Традиционный цикл термоимпульсной обработки включает такие этапы:

- размещение обрабатываемых деталей в камере;
- герметизацию камеры;
- последовательное наполнение камеры топливом и окислителем;
- поджог и горение смеси;
- программируемый по времени выпуск продуктов сгорания;
- открытие камеры и выемка обработанных деталей.

В качестве горючего в термоимпульсных машинах используются различные газы – метан, водород, ацетилен, пары бензина. В качестве окислителя – воздух или кислород. В рассматриваемой задаче принят случай обработки метано-воздушной смесью, как наиболее распространенный. Заметим, что моделирование аналогичных процессов с иными составами топливных смесей не имеет принципиальных отличий, а требует лишь изменения исходных данных о свойствах компонентов.

Наполнения камеры смесью метана и воздуха происходит в 3 этапа: наполнение камеры метаном; наполнения камеры воздухом; выдержка. Признаком завершения этапа наполнения для каждого из компонентов смеси служит заданный уровень давления. После чего происходит поджог смеси и ее горение.

Для численного исследования поставленной задачи использовалась система уравнений Навье – Стокса:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_k) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_i u_k - \tau_{ik}) + \frac{\partial P}{\partial x_i} = S_i, \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} ((\rho E + P)u_k + q_k - \tau_{ik}u_i) = S_k u_k + Q_H, \quad (3)$$

где u_i – компоненты вектора скорости газа;
 ρ, p – плотность и давление газа;
 S_i – внешние объемные силы;
 E – полная энергия единичной массы газа;
 Q_H – тепло, выделяемое в единичном объеме газа;
 τ_{ik} – тензор вязких сдвиговых напряжений;
 q_i – тепловой поток.

Тензор вязких сдвиговых напряжений определяется следующим образом:

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (4)$$

где $\mu = \mu_l + \mu_t$ – коэффициент вязкости;
 μ_l – коэффициент молекулярной (динамической) вязкости;
 μ_t – коэффициент турбулентной вязкости;
 δ_{ij} – дельта-функция Кронекера
 k – кинетическая энергия турбулентности.

Для определения μ_t и λ_t (коэффициента турбулентной теплопроводности) существуют многочисленные полуэмпирические теории турбулентности. В настоящей работе используются уравнения SST модели турбулентности [5], показывающей высокую точность при моделировании пристеночных течений.

В этой модели для задания значения турбулентной вязкости используется выражение:

$$\mu_t = \frac{\rho a_1 k}{\max(a_1 \omega; \Omega F_2)}, \quad (5)$$

где $F_2 = \tanh(\arg_2^2)$;

$$\arg_2 = \max \left(2 \frac{\sqrt{k}}{0,09 \omega y}; \frac{500 \nu}{y^2 \omega} \right) - \text{функция, которая равна единице для погранич-$$

ного слоя и нулю для свободных слоев;

$\Omega = (\partial u / \partial n)$ – производная скорости течения по направлению нормали к стенке.

Для определения кинетической энергии и ее диссипации используются уравнения:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i k) &= \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_i} \left((\mu_l + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right), \\ \frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \omega) &= \frac{\gamma \rho}{\mu_m} \tau_{ij} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_i} \left((\mu_l + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right) + \end{aligned} \quad (6)$$

$$+ 2\rho(1 - F_1)\sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (7)$$

где $\beta, \beta^*, \sigma_k, \sigma_{\omega}$ – эмпирические константы, вычисляемые по формуле $\varphi = F_1\varphi_1 + (1 - F_1)\varphi_2$, где φ_1, φ_2 соответствующие эмпирические коэффициенты $k - \varepsilon$ и $k - \omega$ моделей турбулентности.

F_1 – функция, играющая роль переключателя между моделями, так, что вблизи стенки $F_1 = 1$ и вдали от поверхности $F_1 = 0$

Немецкий ученый Ментер, впервые предложивший формулировку SST модели, из условия устойчивости вычислений обосновал выбор функции F_1 в виде:

$$F_1 = \tanh\left(\arg_1^4\right), \quad (8)$$

$$\text{где } \arg_1 = \min\left[\max\left(\frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\nu}{y^2\omega}\right), \frac{4\rho\sigma_{\omega 2}k}{CD_{k\omega}y^2}\right];$$

y – расстояние до ближайшей стенки;

$$CD_{k\omega} = \max\left(2\rho\sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-20}\right).$$

Тепловой поток моделируется с помощью уравнения:

$$q_k = -\left(\frac{\mu_l}{Pr} + \frac{\mu_t}{\sigma_c}\right) c_p \frac{\partial T}{\partial x_k} + q_u, \quad (9)$$

где $\sigma_c = 0.9$ – эмпирическая константа;

Pr – число Прандтля;

c_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении;

q_u – тепловой поток от излучения (из-за сложности решения уравнения переноса излучения оно рассматривалось в многогрупповом диффузном приближении (модель P1)).

В случае наполнения камеры сгорания импульсных машин имеет место многокомпонентное течение газов. В этом случае изменение концентраций компонентов смеси в пространстве вследствие диффузии моделируется следующими уравнениями:

$$\frac{\partial \rho y_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k y_i) = \frac{\partial}{\partial x_k} \left((D_{ij} + D_{ij}^t) \frac{\partial y_i}{\partial x_k} \right), i = 1, 2, \dots, N, \quad (10)$$

где y_i – концентрация i -го компонента смеси $\left(\sum_{i=1}^N y_i = 1\right)$;

D_{ij}, 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, σ – турбулентное число Шмидта.

Для определения теплофизических свойств газов, т.е. зависимостей плотности, вязкости, теплопроводности, удельных теплоемкостей, коэффициентов диффузии компонент от давления, температуры и концентрации компонентов, использованы уравнения состояния, а также известные эмпирические и полуэмпирические зависимости.

При исследовании горения, использовалась модель конечной скорости химических реакций. В этом случае химическая реакция горения описывается как совокупность K элементарных реакций с количеством вовлеченных компонент N_c :



где v_{kI} – стехиометрический коэффициент для компоненты I в реакции k .

Величина выделения/поглощения тепла Q_{HI} для компоненты I вычисляется как сумма производства для всех элементарных реакций с ее участием:

$$Q_{HI} = W_I \sum_{k=1}^K (v_{kI}^{\bullet\bullet} - v_{kI}^{\bullet}) R_k, \quad (12)$$

где R_k – скорость развития элементарной химической реакции k .

Использованная модель предполагает, что скорость элементарной реакции k может быть отрицательной, если определена обратная реакция. Поэтому, величина R_k вычисляется как:

$$R_k = \left(F_k \prod_{I=A,B,C,\dots}^{N_c} [I]^{r_{ki}^{\bullet}} - B_k \prod_{I=A,B,C,\dots}^{N_c} [I]^{r_{ki}^{\bullet\bullet}} \right), \quad (13)$$

где $[I]$ – молярная концентрация компонента I ;

F_k, B_k – константы прямой и обратных реакций соответственно;

r – доля компонента I принимающая участие в элементарной реакции k (для большинства реакций равна стехиометрическому коэффициенту).

Для определения констант прямых и обратных реакций используются температурные зависимости Аррениуса:

$$F_k = A_{k1} T^{\beta_{k1}} \exp\left(-\frac{E_k}{RT}\right), \quad (14)$$

$$B_k = A_{k2} T^{\beta_{k2}} \exp\left(-\frac{E_k}{RT}\right), \quad (15)$$

где A_k, β_k – эмпирические коэффициенты;

E_k – энергия активации.

С учетом сложности процессов, происходящих при термоимпульсной обработке, для оценки адекватности разработанных моделей была решена тестовая задача по моделированию горения метано-воздушной смеси в замкнутой цилиндрической камере.

Результаты моделирования и их обсуждение

Результаты численного моделирования с использованием описанной модели сравнивались с экспериментальными данными и результатами численного мо-

делирования характера изменения давления при сгорании газозвушной смеси в замкнутой камере, проведенными в лаборатории LRET Пусанского национального университета (Южная Корея). Схема и внешний вид установки, на которой проводились измерения, приведены на рис. 3.

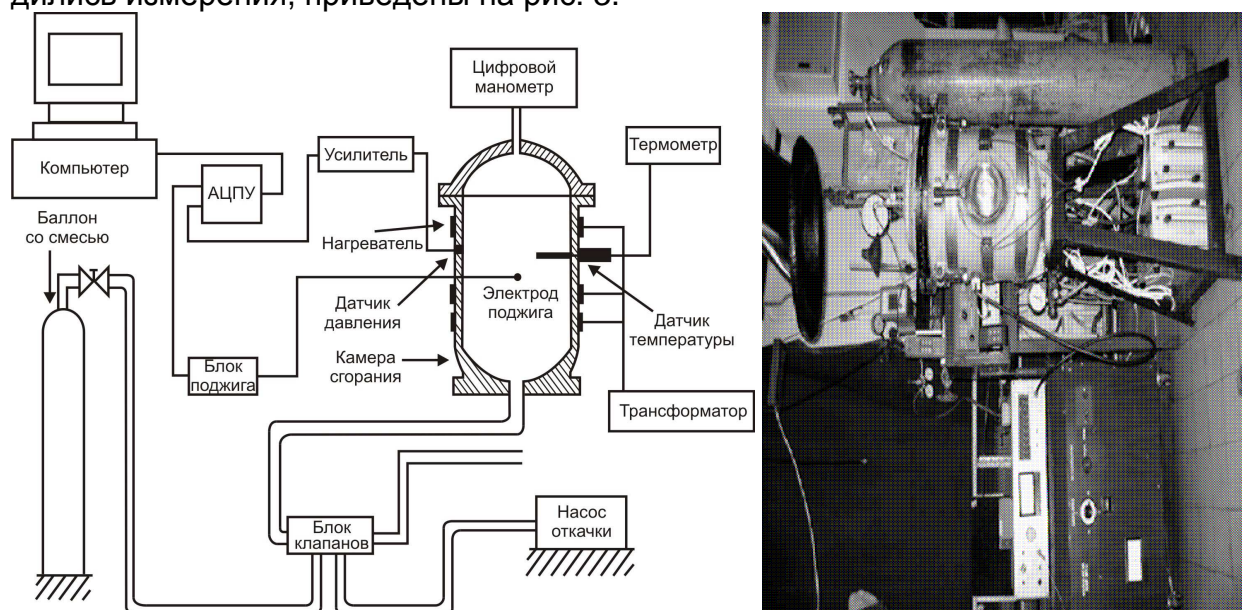


Рис. 3. Схема и внешний вид установки для исследования процесса сгорания в замкнутой камере (Пусанский национальный университет, Южная Корея)

В камеру сгорания экспериментальной установки подавалась заранее подготовленная смесь метан–воздух с известным соотношением компонентов. Электрод для поджога смеси располагался в центре камеры. Начальная температура смеси контролировалась при помощи соответствующих датчиков. Исследовательской группой, проводившей эксперименты, параллельно проводилось численное моделирование аналогичной задачи в среде пакета ANSYS CFX [6].

При численном моделировании на основании разработанных моделей точно соблюдались условия по геометрическим размерам и материалу стенок камеры, начальным значениям давления, температуры и фракционного состава смеси, месту инициации сгорания в камере. Кроме того, при моделировании по данным работы [6] соблюдался размер расчетной сетки по количеству и типу элементов. На рис. 4 приведены сравнительные результаты моделирования.

По результатам расчетов по разработанным моделям погрешность определения максимального давления в камере составила 1,28%, а времени горения – 5%. Кривая зависимости давления в камере по времени, полученная путем моделирования качественно совпадает с экспериментальными данными. Погрешность определения давления не превосходит 5,7%, что в 5 раз превосходит по точности результаты моделирования LRET. Таким образом, можно сказать, что разработанная математическая модель достаточно хорошо описывает реальный процесс горения метано-воздушной смеси в камере сгорания закрытого типа.

В дальнейшем при помощи разработанных моделей были исследованы процессы смесеобразования и сгорания топливной смеси в камере термоимпульсной машины с установленной в камере деталью корпуса поршневого авиационного двигателя.

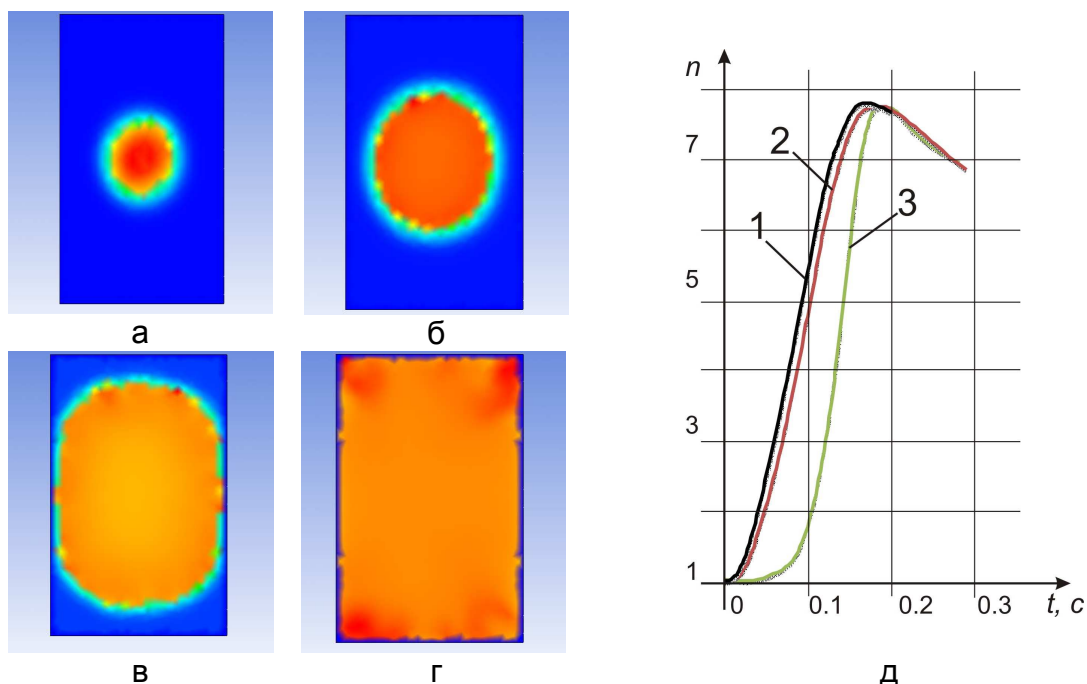


Рис. 4. Результаты моделирования тестовой задачи: а – распределение температур при $t=0,005$ с; б – $t=0,02$ с; в – $t=0,055$ с; г – $t=0,185$ с; д – зависимости степени повышения давления от времени: 1 – результаты моделирования ХАИ; 2, 3 – эксперимент и моделирование ПНУ

Сетка конечных элементов для данной задачи приведена на рис. 5. При построении сетки применены тетраэдрические элементы с размерами, уменьшающимися вблизи элементов детали со сложной формой. Для адекватного моделирования пристеночных процессов у стенок сетка имеет слои призматических элементов, с экспоненциально уменьшающейся толщиной.

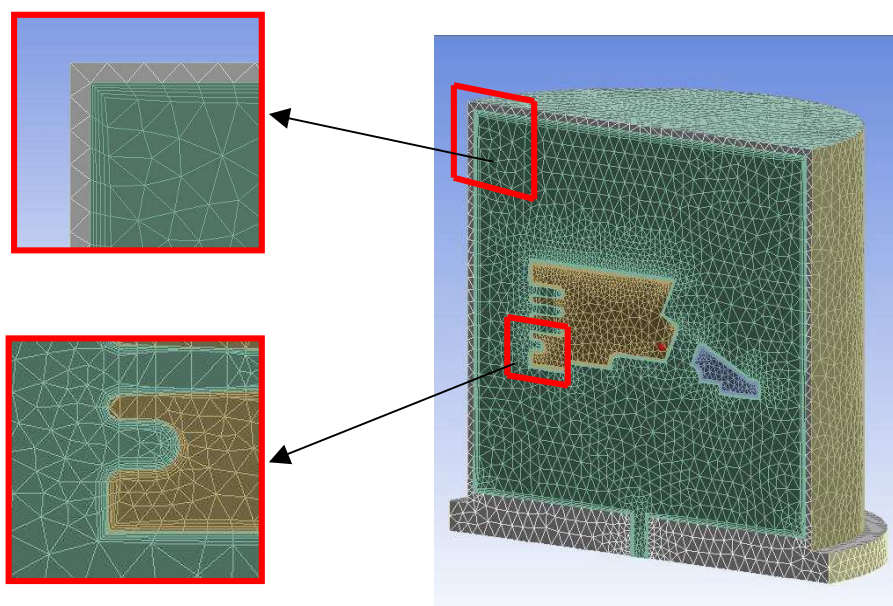


Рис. 5. Расчетная сетка конечных элементов
В ходе численного моделирования изучалось распределение массовой кон-

центрации метана и его влияние на температурный режим в камере сгорания в процессе горения. Исследования подтвердили, что при последовательном наполнении камеры компонентами смеси ее состав крайне неравномерен (рис.6). Кроме того, в ходе моделирования установлено, что позиционирование обрабатываемой детали в камере является очень важным. Деталь не должна создавать зоны затенения, при которых в камере создаются области, в которые проникновение газа практически невозможно, и что в дальнейшем будет препятствовать распространению пламени при горении.

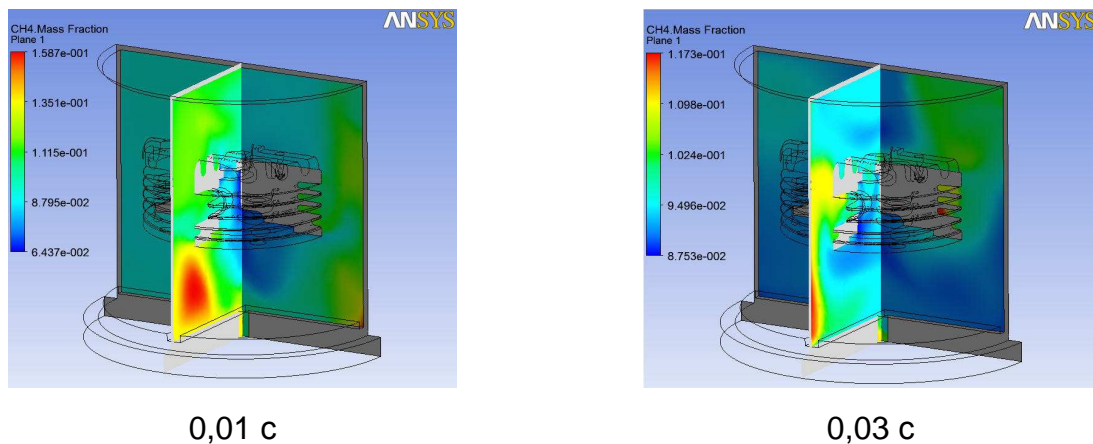


Рис. 6. Распределение массовой концентрации метана в камере в течение выдержки после окончания наполнения

Наибольшие отличия от стехиометрического состава при последовательном наполнении наблюдаются вблизи обрабатываемой детали, особенно в областях около конструктивных элементов сложной формы, в глухих отверстиях (рис. 7).

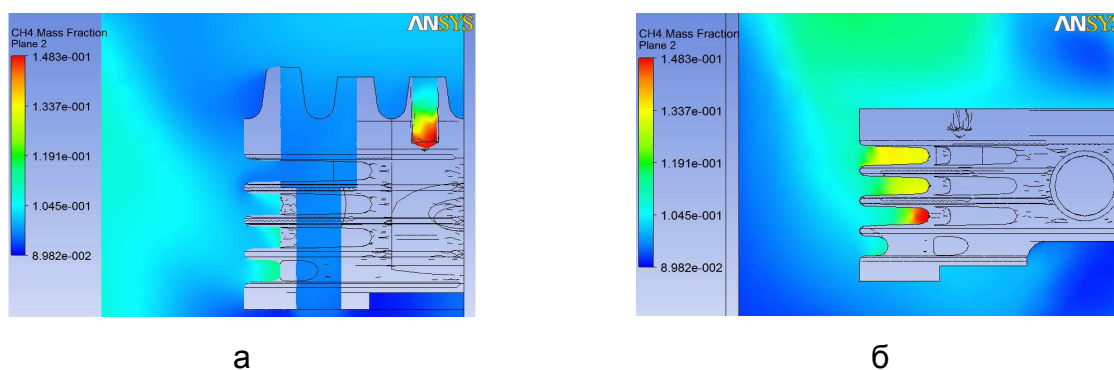


Рис. 7. Массовая концентрация метана вблизи конструктивных элементов детали сложной формы

При моделировании горения топливной смеси исследовалось распространение фронта пламени. Фронт пламени имеет очень сложную пространственную форму. Для получения информации о распространении пламени и о влиянии на него формы и положения детали в камере, строились изоповерхности, соответствующие температуре 1800°С для различных моментов времени (рис. 8).

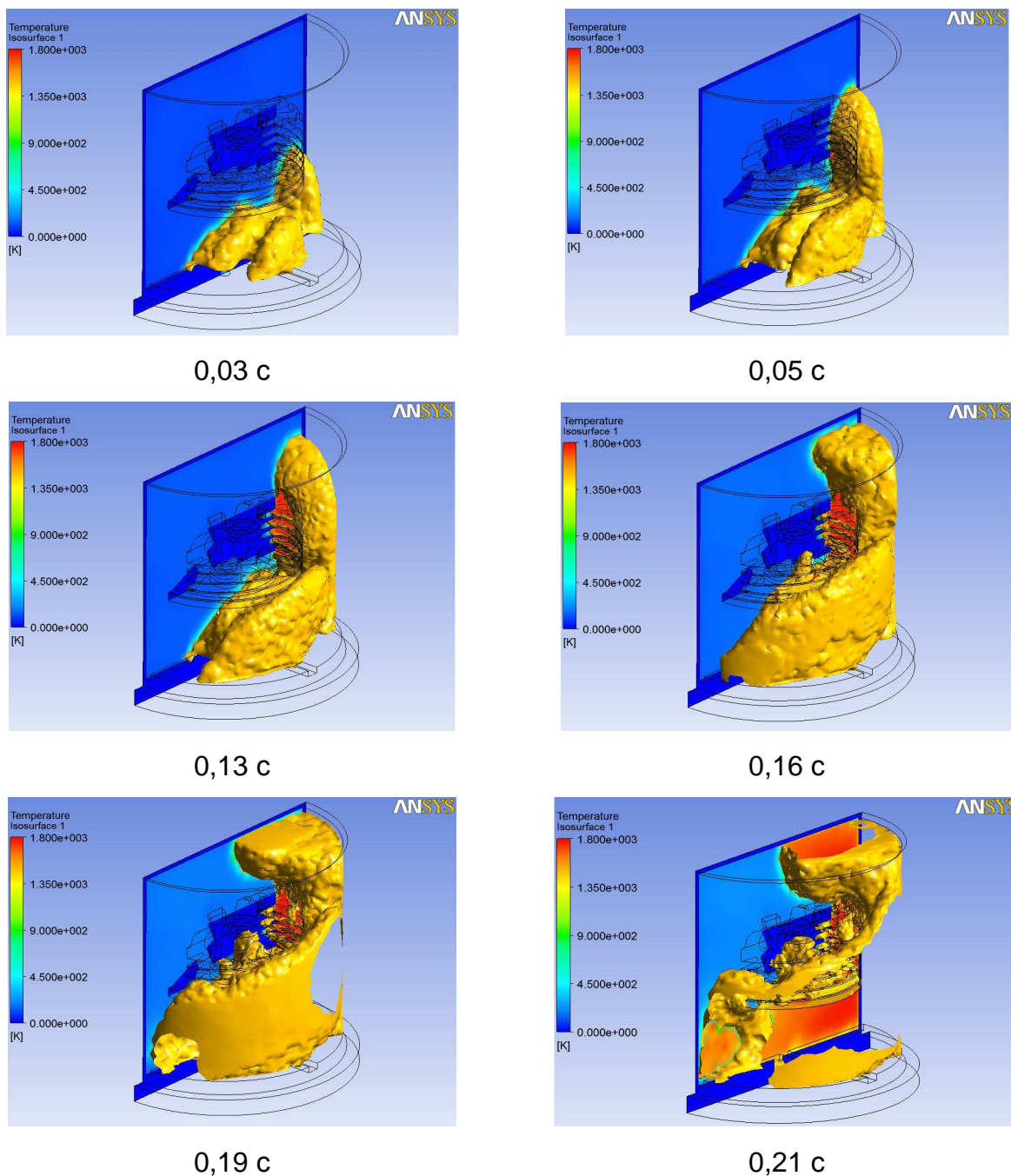


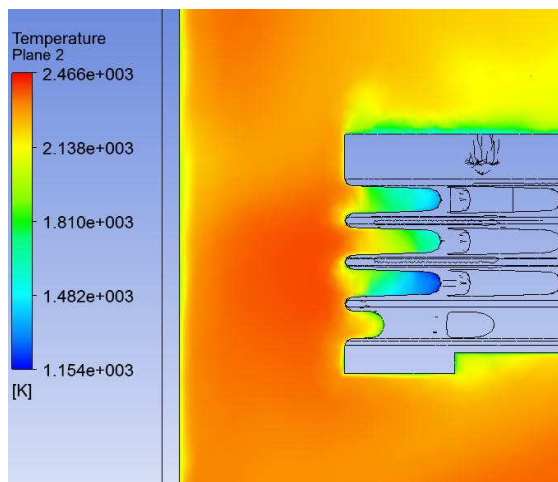
Рис. 8. Расположение фронта пламени в камере в различные моменты времени после инициации горения

Анализ данных моделирования показывает, что на распространение пламени в камере оказывает существенное влияние не только форма и место расположения обрабатываемой детали, но и остаточная скорость перемешивания смеси после окончания наполнения. Направление распространения пламени в рассматриваемом случае соответствовало направлению движения смеси после окончания выдержки.

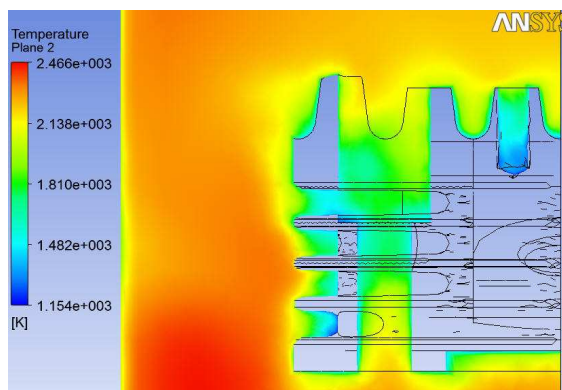
Результаты моделирования подтвердили, что неоднородность смеси оказывает существенное влияние на температуру продуктов сгорания и, как следствие этого, на теплопередачу в тело обрабатываемой детали. На рис.9 приведены

распределения температур вблизи конструктивных элементов обрабатываемой детали в момент окончания горения. Как следует из данных моделирования, значения температуры продуктов сгорания в таких областях находятся в пределах 1100...2400°C. Очевидно, что такой разброс температур будет приводить к тому, что качество термоимпульсной очистки различных участков поверхности детали сложной формы может существенно отличаться.

При анализе процесса нагрева детали определялся уровень температур по ее толщине, достигаемый в процессе обработки. Максимальные температуры достигались в области тонких полотен с относительно большой поверхностью (рис. 10) и достигали 140...150°C для исследованного режима.



а



б

Рис. 9 . Распределение температур вблизи конструктивных элементов детали сложной формы

Следует отметить, что проведенное моделирование процесса термохимической обработки соответствует применяемому в практике режиму бездетонационного сгорания в камере с последующей выдержкой, т.е. разработанная модель процесса не учитывает влияния роста давления на скорость горения.

При выполнении дальнейших работ по моделированию процессов термоимпульсной обработки деталей предполагается создание уточненных моделей, учитывающих детонационные процессы горения топливной смеси.

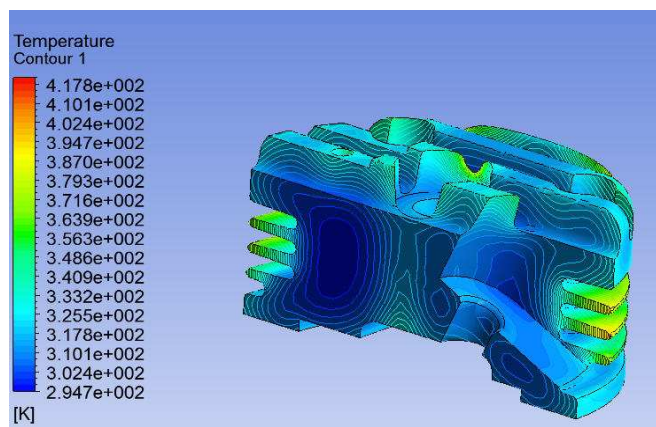


Рис. 10. Распределение температур по толщине обрабатываемой детали

Планируется моделирование термонапряженного состояния тонкостенных деталей при термоимпульсной обработке, моделирование процессов в камере при выпуске продуктов сгорания, а также моделирование течений в исполнительных механизмах системы наполнения, с целью оптимизации их конструкции.

Выводы

1. Предложены математические модели для расчета теплового воздействия на деталь при термоимпульсной обработке с учетом неравномерности состава топливной смеси с использованием SST модели турбулентности. Модель учитывает зависимости скоростей химических реакций при горении от температуры, процессы теплообмена конвекцией и излучением.

2. Адекватность разработанных моделей подтверждена сравнением численных решений тестовой задачи с результатами экспериментальных измерений и результатами моделирования, полученными другими авторами. Относительно экспериментальных данных погрешность определения максимального давления в камере составила 1,28%, времени горения – 5%.

3. Установлено, что неоднородность топливной смеси оказывает существенное влияние на уровень температур продуктов сгорания для деталей, имеющих конструктивные элементы сложной формы. Перепад температур вблизи различных участков обрабатываемых поверхностей может составлять более 1000°C. Для соблюдения условий обработки в этом случае целесообразно использовать наполнение заранее подготовленной смесью.

4. Предложены направления совершенствования моделей термоимпульсной обработки, включая создание моделей учитывающих детонационные процессы, моделирование термонапряженного состояния обрабатываемых деталей, моделирование процессов теплопередачи в камере при выпуске продуктов сгорания.

Список литературы

1. Burr prevention and minimization for the aerospace industry. Laboratory for manufacturing automation. Research reports 1999–2000. University of California, Berkeley. 2002. – P.4-9.

2. Gillespie L. Deburring and edge finishing handbook / L. Gillespie – New York City: Industrial Press, 1999. – 404p.

3. Мазниченко С.А. Об особенностях смесеобразования в тепловых приводах импульсного оборудования / С.А. Мазниченко, С.И. Планковский, О.С. Борисова // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2007. - №7(44). – С.45-52.

4. Лосев А.В. Повышение эффективности зачистки деталей пневматических и гидротопливных систем при использовании термоимпульсного метода: дис. ...канд. техн. наук: 05.02.08; защищена 14.05.1995; утв. 07.10.1995/ Лосев Алексей Васильевич. – Х., 1995. – 210с.

5. Menter F.R. Two-equations eddy-viscosity turbulence models for engineering applications / F.R. Menter // *AIAA-Journal* – 1994. – № 32(8). – P. 269 – 289.

6. Paik J.K. CFD simulations of gas explosion and fire actions [Электронный ресурс] / Paik J.K. // *Ships and Offshore Structures* – 2010. – № 5. – С.3-12. – Режим доступа до журн. : <http://www.informaworld.com/smpp/content~content=a916988728&db=all>

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Епифанов С.В.,
Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»

Поступила в редакцию 12.05.2010

Моделювання термоімпульсної обробки з урахуванням неоднорідності паливної суміші

Запропоновано математичні моделі для розрахунку теплового впливу на деталі при термоімпульсній обробці з урахуванням нерівномірності фракційного складу паливної суміші. Моделі враховують швидкість хімічних реакцій при згорянні, процеси теплообміну конвекцією та випромінюванням. Для моделювання теплообміну при турбулентних течіях застосовано SST модель турбулентності. Достовірність результатів моделювання підтверджено порівнянням числових даних з результатами експериментальних вимірювань. Показано, що неоднорідність паливної суміші істотно впливає на режими термоімпульсної обробки деталей складної геометричної форми.

Ключові слова: термоімпульсна машина, неоднорідність паливної суміші, згоряння в камері, математичне моделювання

Modeling of thermal-pulse finishing taking into account heterogeneity of a fuel mix

Numerical models taking into account non-uniformity of a fuel mix fractional structure for calculation of thermal influence on a workpiece at thermal-pulse finishing are offered. The model considers limit speed of chemical reactions, which depends on temperature, heat exchange processes by convection and radiation. For heat exchange modeling at turbulent flows it is used SST turbulence model. Reliability of modeling results is confirmed by comparison of the numerical data with results of experimental measurements. It is shown that heterogeneity of a fuel mix makes essential influence on modes of thermal-pulse finishing of workpiece with difficult geometrical form.

Keywords: the thermal-pulse machine, heterogeneity of a fuel mix, burning in the chamber, numerical modeling