

УДК 622.614.2

**С. И. ПЛАНКОВСКИЙ, О. В. ШИПУЛЬ, О. В. ТРИФОНОВ, Е. С. ПАЛАЗЮК,
В. Л. МАЛАШЕНКО***Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского "ХАИ"***МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ЗАТУХАНИИ
УДАРНЫХ ВОЛН В ЗАМКНУТОЙ КАМЕРЕ**

Приведены результаты численного моделирования процесса теплообмена при затухании ударных волн в камере после детонации газовых топливных смесей. Для моделирования процесса теплообмена между продуктами сгорания и твердым телом, расположенным в камере, обосновано применение SST модели турбулентности. Проведено сравнение результатов численного моделирования с данными экспериментальных исследований. Показано, что использованная модель адекватно описывает процесс теплообмена. Использование предложенной модели рекомендовано для расчетов процессов термоимпульсной обработки детонирующими газовыми смесями.

Ключевые слова: ударные волны, теплообмен, математическое моделирование, термоимпульсная обработка.

Введение

Уникальным свойством термоимпульсной обработки детонирующими газовыми смесями является возможность очистки наружных и внутренних поверхностей произвольно сложной формы, присутствующих элементам гидравлических и топливных систем летательных аппаратов (ЛА). Однако отсутствие автоматизированного оборудования, реализующего данный способ обработки, считается одной из основных проблем, мешающих широкому использованию термоимпульсных технологий очистки в авиационной промышленности [1].

При удалении заусенцев и обработке кромок термоимпульсным методом в качестве инструмента выступают продукты детонационного сгорания газообразных топливных смесей. Несмотря на различия возможных механизмов удаления заусенцев (оплавление, сгорание, хрупкое скалывание), обработка в основном происходит в результате интенсивного теплового воздействия на удаляемые элементы за счет возникновения ударных волн [2].

Существующие на сегодняшний день аналитические модели оплавления заусенцев под воздействием теплового потока не имеют экспериментального подтверждения и носят скорее теоретический характер. Поэтому создание верифицированных математических моделей термоимпульсной обработки на основе современных САД/САЕ-систем представляет собой актуальную задачу.

**Описание решаемой задачи
и примененной математической модели**

Для определения требуемых параметров термоимпульсной обработки становится невозможно проводить расчеты без применения программных комплексов для трехмерного газодинамического моделирования. При таком подходе крайне важным становится анализ степени адекватности результатов моделирования.

При термоимпульсной обработке удаление заусенцев происходит в результате их нагрева до высоких температур, поэтому вопросы теплопередачи являются ключевыми в исследованиях данного процесса. Особое внимание следует уделять зоне контакта твердого тела с газовой средой.

Для верификации численной модели за основу были взяты эксперименты, проведенные в Институте гидродинамики СО АН СССР [3, 4]. В рамках данной работы проводилось исследование временной зависимости температуры стальной проволоки длиной 9 см и диаметром 0,5 мм после детонации газовой смеси. В эксперименте во взрывную камеру 1 (рис. 1) помещали на электродах 2 исследуемую проволоку 3. Камеру откачивали форвакуумным насосом 4 и заполняли газовой смесью из баллона 5 до нужного давления. Затем инициировалась детонация пережиганием нихромовой проволоки 6, которую располагали под центром крышки камеры. Для измерения давления продуктов детонации на цилиндр 7, соединенный с камерой отводной трубкой, наклеивался датчик давления 8.

Для создания математической модели были ис-

пользованы результаты анализа решения тестовых задач теплообмена между газовым потоком и твердым телом с использованием различных моделей турбулентности [5]. Результаты моделирования показали, что $k-\omega$ и $k-\epsilon$ модели турбулентности дают завышенную оценку максимального значения числа Нуссельта (до 20%), тогда как результаты расчета при применении SST модели отличаются от экспериментальных данных не более чем на 5%. Исходя из этого, в рамках данной задачи использовалась SST модель турбулентности.

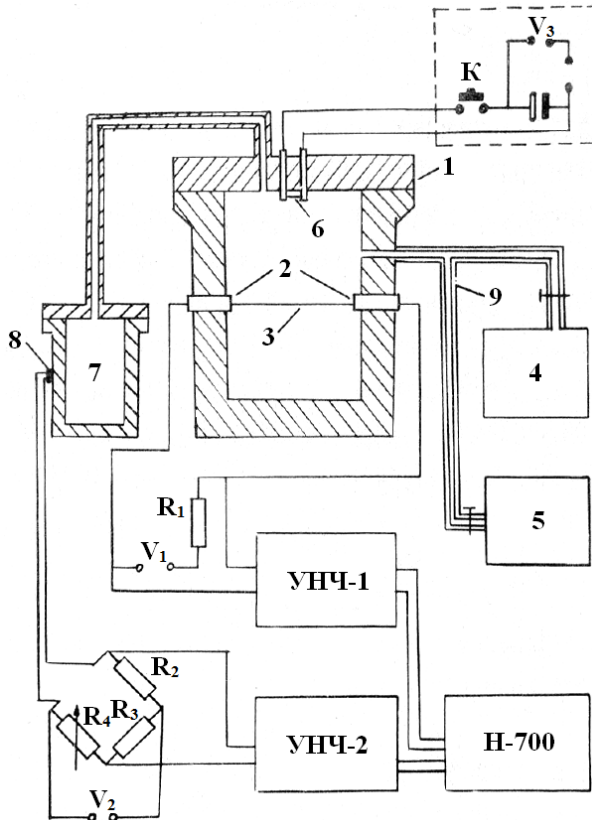


Рис. 1. Схема экспериментальной установки [5]

Рассматривалось сгорание неподвижной стехиометрической горючей смеси при различных начальных давлениях. Моделирование проводилось на основе модели скорости горения с применением подробного механизма реакций, что позволяет наиболее точно описывать детонационное сгорание.

Расчет процесса теплообмена проводился с использованием пакета ANSYS CFX. При моделировании процессов переноса в пристеночной области использовался метод масштабируемых пристеночных функций Лаундера [6]. Преимуществом такого подхода является уход от ограничений по размерам расчетной сетки в пристеночной области.

Обычным требованием при использовании различных моделей турбулентности является соблюдение в пристеночной области условия вида:

$$y^+ \geq Y_{\text{ниж}}^+$$

где $y^+ = \frac{\rho \Delta u \tau}{\mu}$ – безразмерное расстояние от стенки

первого узла сетки; $Y_{\text{ниж}}^+$ – предельное нижнее значение, величина которого определяется используемой моделью турбулентности (обычно ≈ 20).

Для определения профиля температуры в пристеночном слое использовалось аналитическое решение Кадера [7]

$$T^+ = \text{Pr} \cdot \tilde{y}^+ \exp(-\Gamma) + [2,12 \ln(1 + \tilde{y}^+) + \beta] \exp(-1/\Gamma),$$

$$\text{где } \beta = \left(3,85 \text{Pr}^{1/3} - 1,3 \right)^2 + 2,12 \ln(\text{Pr}),$$

$$\Gamma = \frac{0,01(\text{Pr} \cdot \tilde{y}^+)^4}{1 + 5 \text{Pr} \cdot \tilde{y}^+}, \quad T^+ = \frac{\rho c_p \tilde{u}_\tau (T_w - T_f)}{q_w}, \quad T_w - \text{тем-}$$

пература стенки; T_f – температура продуктов сгорания в ядре потока; q_w – конвективный тепловой поток в стенку.

Исходя из этого выражения, можно получить следующую зависимость для расчета величины конвективного теплового потока:

$$q_w = \frac{\rho c_p \tilde{u}_\tau}{T^+} (T_w - T_f).$$

Для определения профиля скорости \tilde{u}_τ в пристеночном слое были использованы автоматически перестраиваемые пристеночные функции [8], получаемые смешением решений в формулировке вязкого подслоя и пристеночных функций с использованием значений плотности расчетной сетки. Для этой задачи хорошо подходит уравнение для удельной диссипации энергии турбулентности ω , используемое в SST модели, так как оно имеет аналитическое решение и для вязкого подслоя и для логарифмического слоя. С его использованием определялась функция смешения с учетом величины y^+ .

Решения для ω в вязком и логарифмическом пристеночном слое могут быть записаны в виде [8]:

$$\omega_{\text{вяз}} = \frac{6\nu}{0,075 y_1^2}; \quad \omega_{\text{лог}} = \frac{1}{3k} \frac{u_\tau}{y_1}.$$

Они могут быть переформулированы в терминах y^+ при помощи гладкой функции смешения:

$$\omega(y^+) = \sqrt{\omega_{\text{вяз}}^2(y^+) + \omega_{\text{лог}}^2(y^+)}.$$

Аналогичная формулировка используется для задания пристеночного профиля скорости:

$$u_\tau^{\text{вяз}} = \frac{U_1}{y^+}; \quad u_\tau^{\text{лог}} = \frac{U_1}{\frac{1}{k} \ln(y^+) + C};$$

$$u_\tau = \left[(u_\tau^{\text{вяз}})^4 + (u_\tau^{\text{лог}})^4 \right]^{0,25},$$

где U_1 – значение скорости в ближайшем к стенке узле сетки.

Расчетная модель была геометрически аналогична описанному выше эксперименту. Теплофизические свойства проволоки (материал – Ст 20) задавались как функции от температуры (рис. 2).

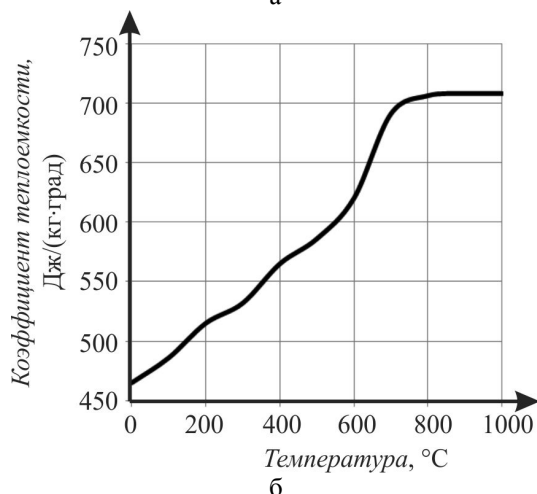
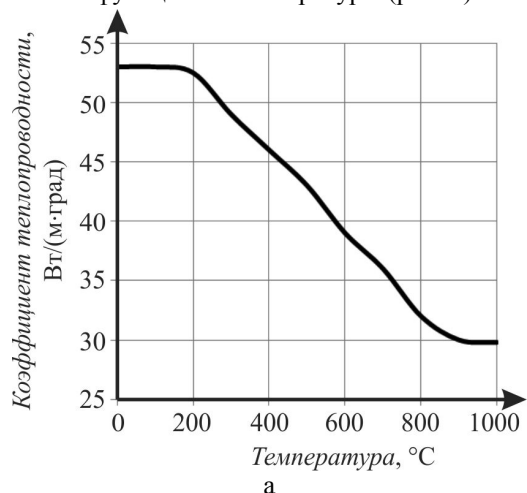


Рис. 2. Влияние температуры на теплофизические свойства стали Ст 20:

- а – коэффициент теплопроводности λ ;
б – коэффициент теплоемкости $c_{уд}$

Расчетная область делилась на три части: стенки камеры, внутренний объем, заполненный топливной смесью, и проволока. Поскольку теплообмен между продуктами сгорания и проволокой осуществляется через ее цилиндрическую поверхность, для упрощения модели и сокращения вычислительных затрат рассматривался лишь участок проволоки (рис. 3). Условия прямого инициирования детонации моделировались заданием области с повышенными значениями температуры, давления и начальным прогрессом реакции, расположенной в месте подрыва нихромовой проволоки. При построении сетки применялись тетраэдрические элементы с размерами, уменьшающимися вблизи контакта проволоки с газом и в зоне поджога.

Для более точного моделирования течений в пограничном слое вблизи проволоки и стенок камеры строились слои из призматических элементов. Размеры элементов вблизи поверхности контакта газа и проволоки задавались с учетом требований к величине y^+ .

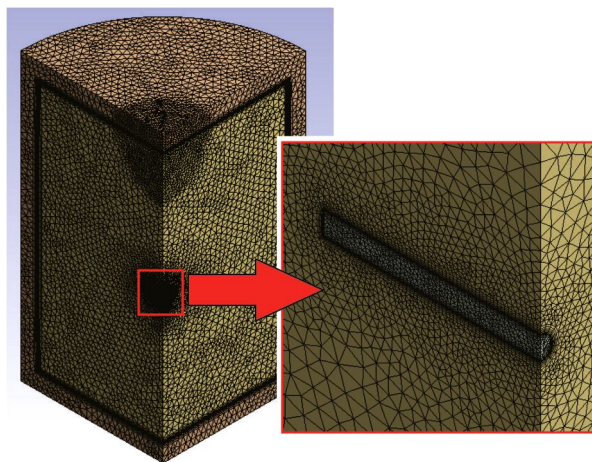


Рис. 3. Расчетная сетка конечных элементов

Анализ результатов моделирования

На первом этапе верификации модели было произведено сравнение численных и экспериментальных результатов для задачи затухания ударных волн после детонации в замкнутой камере [5]. Геометрия расчетной области соответствовала камере, которую использовали при эксперименте. Моделирование выполняли с учетом теплообмена со стенкой камеры.

Считалось, что в момент перед зажиганием в камере находится неподвижная гомогенная смесь с массовой концентрацией топлива в соответствии со стехиометрическим составом. При расчетах использовалась модель на основе расчета прогресса реакции с применением подробного кинетического механизма горения смеси ацетилен + кислород, которая применялась при эксперименте. Расчет производился для двух конфигураций камеры разной длины, для которых имелись экспериментальные данные.

Общее время процесса в обоих расчетных случаях составляло 6,5 мс, из которых в течение ~ 5 мс наблюдалось существование ударных волн с ярко выраженным ударным фронтом. Далее фронт волны становился более размытым, и распространение волн переходило в режим стоячих колебаний.

Так как наиболее интенсивный нагрев детали при термоимпульсной обработке наблюдается в период существования ударных волн, окончательное затухание стоячих колебаний не рассматривалось.

Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными (рис. 4) показывает их достаточно хорошее совпадение (с погрешностью

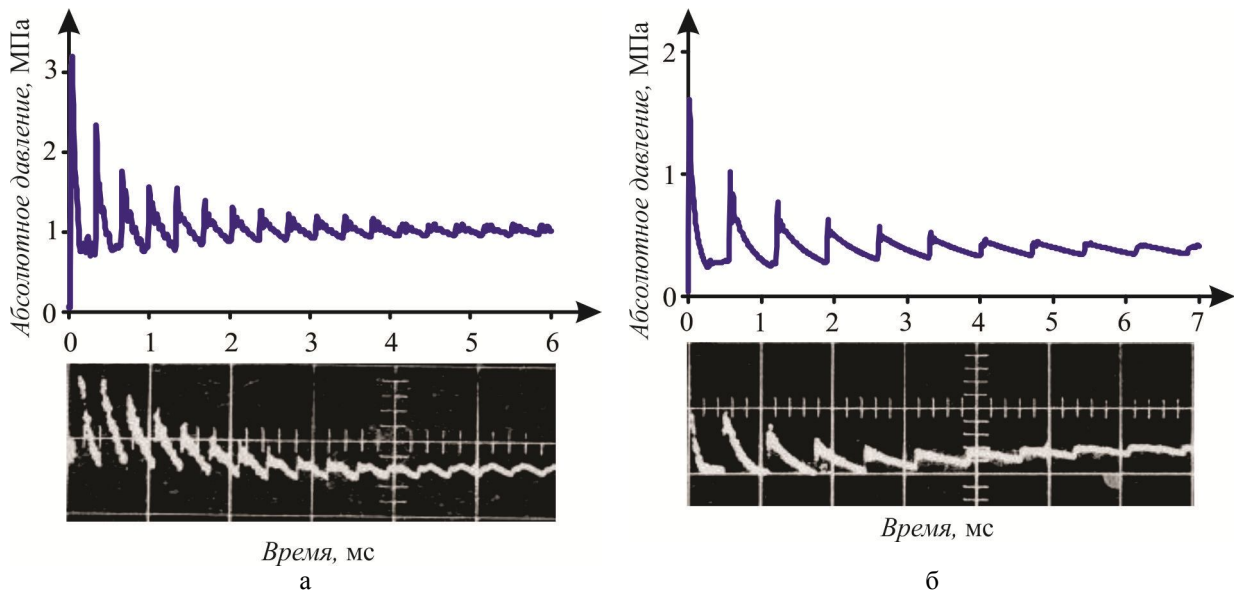


Рис. 4. Сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными данными:
а – камера $L = 0,2$ м, $P_0 = 0,1$ МПа; б – камера $L = 0,2$ м, $P_0 = 0,04$ МПа

до 3%). В обоих случаях период распространения ударных волн и количество пробогов до затухания соответствует экспериментальным данным.

Расчетное значение средней скорости распространения ударной волны составило 1200 м/с, что в среде продуктов горения составляет $\sim 1,3$ числа Маха, что соответствует экспериментальному значению средней скорости 1,3 М [5].

Следует отметить, что в эксперименте, ввиду медленной развертки, отражения ударной волны от стенок камеры практически незаметны на осциллограммах. Наличие отраженных ударных волн наблюдается только на первом пике осциллограммы в опыте с камерой длиной $L = 0,2$ м и начальным давлением $P_0 = 0,1$ МПа. В то же время результаты численного моделирования описывают релаксацию за фронтом ударной волны на протяжении практически всего времени её затухания.

По итогам сравнения результатов моделирования с экспериментальными данными, можно утвер-

ждать, что примененная модель адекватно описывает процессы затухания ударных волн после детонации в замкнутой камере.

Моделирование нагрева проволоки проводилось для случаев детонационного сгорания стехиометрической смеси пропан + кислород при начальных давлениях 0,5; 1,5; 2,9 бар.

Качественных отличий при теплопередаче выявлено не было. Разница наблюдалась лишь в значениях количества выделяемого тепла, которое возрастало с увеличением показателей начального давления смеси. Типичная зависимость величины осредненного по поверхности проволоки теплового потока показана на рис. 5. Колебания величины теплового потока связаны с прохождением через область, занятую проволокой, фронта ударной волны. Во всех случаях основной нагрев проволоки происходил за время порядка 0,01 с.

При этом проволока в зависимости от начального давления, достигала температур порядка

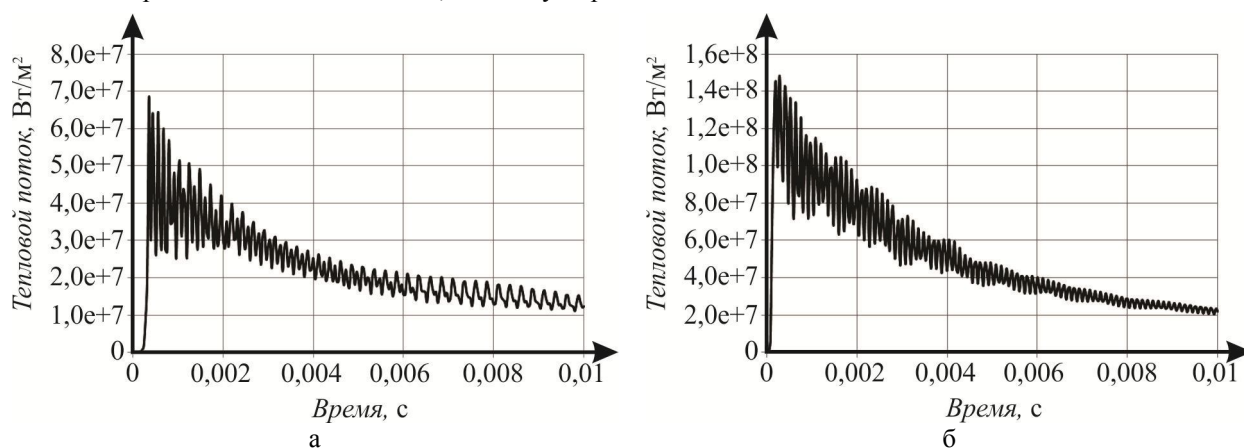


Рис. 5. Зависимости осредненного по цилиндрической поверхности проволоки теплового потока:
а – при начальном давлении смеси 0,5 бар; б – при начальном давлении смеси 2,9 бар

450 – 900 °С (рис. 6). После этого темп нагрева проволоки значительно уменьшался. Наблюдаемое время основного нагрева проволоки (0,01 – 0,02 с) является с некоторой точностью временем затухания ударных волн для случая сгорания смеси пропан + кислород, при действии которых происходит интенсивный теплообмен между продуктами сгорания и проволокой.

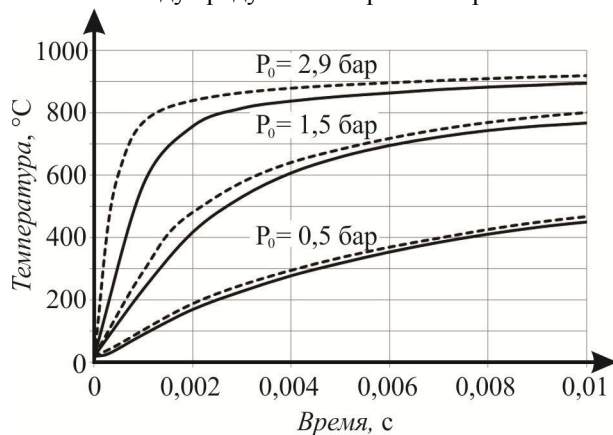


Рис. 6. Сравнение экспериментальных данных с результатами численного моделирования:
 ----- результаты эксперимента;
 ————— результаты численного моделирования

Как видно из результатов моделирования, при росте начального давления смеси интенсивность детонационных процессов повышается. При этом увеличивается как давление продуктов сгорания, так и амплитуда ударных волн. Это приводит к повышению значения тепловых потоков, действующих на поверхность проволоки, что объясняет различные темпы ее нагрева.

Однако чем больших значений температуры достигает проволока во время интенсивного теплообмена, тем медленнее становится ее скорость нагрева. Это может быть объяснено уменьшением коэффициента теплопроводности и ростом коэффициента теплоемкости материала с увеличением температуры.

Наблюдающийся рост погрешности в определении температуры при увеличении начального давления смеси может быть объяснен упрощенным характером примененной модели. В условиях натурального эксперимента прохождение ударной волны вызывает поперечные колебания проволоки. Амплитуда этих колебаний увеличивается с ростом давления во фронте волны. Колебания проволоки приводят к интенсификации теплообмена и увеличивают темп нагрева. Поскольку при расчетах проволока считалась неподвижной, этот фактор учтен не был, с чем может быть связано наблюдающееся отличие в погрешности численных результатов.

Рассмотренный при моделировании процесс теплообмена между продуктами детонации газовой смеси и твердым телом в замкнутой камере полно-

стью соответствует режиму термоимпульсной обработки, при котором происходит оплавление удаляемых заусенцев.

При выполнении дальнейших работ по моделированию процесса термоимпульсной обработки предполагается создание уточненной модели, учитывающей дополнительный источник тепла в удаляемом элементе, связанный с возникновением экзотермической реакции окисления металла при достижении температуры зажигания.

Выводы

1. На основе анализа численных результатов исследования теплообмена с использованием различных моделей турбулентности для задач моделирования процессов термоимпульсной обработки детонирующими газовыми смесями обоснован выбор SST модели.

2. Проведена оценка адекватности численной модели при сравнении результатов расчетов с данными экспериментальных исследований процесса теплообмена при затухании ударных волн в замкнутой камере. Относительно экспериментальных данных погрешность определения времени затухания ударных волн не превышает 3%, а температуры – 5 %.

3. При выполнении дальнейших работ по моделированию процесса термоимпульсной обработки предложено уточнить использованную модель путем учета дополнительного источника тепла от экзотермической реакции окисления металла при достижении температуры зажигания.

Литература

1. Назначение режимов обработки для автоматизированных термоимпульсных установок в условиях информационно-интегрированного производства [Текст] / С. И. Планковский, О. В. Шипуль, В. Л. Малащенко, В. Г. Козлов // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. научных трудов «ХАИ». – Вып. 45. – Х., 2012. – С. 67-77.
2. Моделирование процесса оплавления заусенцев при термоимпульсной обработке детонирующими смесями [Текст] / С. И. Планковский, А. В. Гайдачук, О. В. Шипуль, Е. С. Палазюк // Авиационно-космическая техника и технология. – 2013. – № 3 (100). – С. 4-11.
3. Манжалеи, В. И. Затухание ударных волн после детонации газа в камере [Текст] / В. И. Манжалеи // Гидродинамика взрыва. – 1986. – Вып. 78. – С. 142-153.
4. Адонин, С. М. О теплоотдаче продуктов детонации газовой смеси в камере [Текст] / С. М. Адонин, В. И. Манжалеи // Нестационарные проблемы механики: сб. научных трудов Институ-

та гидродинамики. – Вып. 74. – Новосибирск, 1986. – С. 3-10.

5. Vieser, W. Heat transfer predictions using advanced two-equation turbulence models [Text] / W. Vieser, T. Esch, F. Menter // CFX Validation Report № CFX-VAL10/0602. – 2002. – 73 p.

6. Launder, B. E. The numerical computation of turbulent flows [Text] / B. E. Launder, D. B. Spalding // Comp. Meth. Appl. Mech. Eng. – 1974. – № 3.

– P. 269-289.

7. Kader, B. A. Temperature and concentration profiles in fully turbulent boundary layers [Text] / B. A. Kader // Int. J. of Heat and Mass Transfer. – 1981. – № 24(9). – P. 1541-1544.

8. Menter, F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications [Text] / F. R. Menter // AIAA-Journal. – 1994. – 32(8). – P. 269-289.

Поступила в редакцию 8.01.2014, рассмотрена на редколлегии 12.02.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. каф. технологии производства авиационных двигателей А. И. Долматов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛООБМІНУ ПРИ ЗАГАСАННІ УДАРНИХ ХВИЛЬ В ЗАМКНУТІЙ КАМЕРІ

С. И. Планковский, О. В. Шипуль, О. В. Трифонов, Е. С. Палазюк, В. Л. Малашенко

Наведено результати числового моделювання процесу теплообміну при загасанні ударних хвиль в камері після детонації газових паливних сумішей. Для моделювання процесу теплообміну між продуктами згоряння і твердим тілом, розташованому в камері, обґрунтовано застосування SST моделі турбулентності. Проведено порівняння результатів числового моделювання з даними експериментальних досліджень. Показано, що використана модель адекватно описує процес теплообміну. Використання моделі запропоновано для застосування при розрахунках процесів термоімпульсного оброблення детонуючими газовими сумішами.

Ключові слова: ударні хвилі, теплообмін, математичне моделювання, термоімпульсне оброблення.

THE SIMULATION OF THE HEAT TRANSFER DURING SHOCK WAVES DAMPING IN AN ENCLOSED CHAMBER

S. I. Plankovsky, O. V. Shipul, O. V. Tryfonov, E. S. Palazyuk, V. L. Malashenko

Results of numerical simulation of the heat transfer during shock waves damping in an enclosed chamber after the detonation of gas mixtures are presented. The use of the SST turbulence model for heat transfer simulation between the combustion products and a solid body, located in the chamber, is substantiated. It is done the comparison of numerical and experimental results. It is shown that the used model describes adequately the heat transfer process. Using of this model is proposed for simulation of thermal shock processing with detonating gas mixtures.

Keywords: shock waves, heat transfer, mathematical simulation, thermal shock processing.

Планковский Сергей Игоревич – д-р техн. наук, проф., проф. кафедры технологии производства летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: s.plank@khai.edu.

Шипуль Ольга Владимировна – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры технологии производства летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: o.shipul@khai.edu.

Трифонов Олег Валерьевич – канд. техн. наук, ассистент кафедры технологии производства летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: o.v.trifonov@gmail.com.

Палазюк Евгений Сергеевич – аспирант кафедры технологии производства летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: e.palaz@mail.ru.

Малашенко Владимир Львович – старший преподаватель кафедры технологии производства летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.