

УДК 622.614.2

С. И. ПЛАНКОВСКИЙ, О. В. ШИПУЛЬ, Е. С. ПАЛАЗЮК, С. А. КРАСОВСКИЙ

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского "ХАИ"***МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ ПРИ ТЕРМОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКЕ ДЕТОНИРУЮЩИМИ ГАЗОВЫМИ СМЕСЯМИ**

*Предложена методика расчета тепловых потоков при термоимпульсной обработке детонирующими газовыми смесями. Для моделирования процесса теплообмена между продуктами сгорания и деталями, расположенными в камере, использована модель скорости горения с применением подробного механизма реакций и SST модель турбулентности. Для уменьшения вычислительных затрат предложено использовать моделирование сгорания с учетом теплообмена для камеры с эквивалентной деталью простой формы. Показано, что применение такого подхода позволяет рассчитывать время затухания ударных волн и осредненные тепловые потоки для произвольного давления смеси и геометрической формы детали по результатам моделирования для базового давления смеси в эквивалентной камере. В ходе численных экспериментов подтверждено, что предложенная методика имеет достаточную точность для применения при расчете режимов термоимпульсной обработки.*

**Ключевые слова:** термоимпульсная обработка, математическое моделирование, тепловой поток, затухание ударных волн, эквивалентная деталь.

**Введение**

Технологические процессы финишной термоимпульсной обработки на базе использования детонирующих газовых смесей вызывают особый интерес вследствие их высокой производительности, универсальности и гибкости. В качестве инструмента в данном случае выступают газообразные продукты сгорания, а обработка происходит практически одновременно во всех доступных им местах, что даёт возможность производить очистку и отделку как наружных, так и внутренних поверхностей и кромок деталей.

Постоянно повышающиеся требования к качеству финишной обработки требуют в свою очередь все большей гибкости и точности задания ее режимов. В настоящее время активно ведутся исследования, направленные на разработку научно-обоснованных методов назначения режимов финишной обработки, а также создание автоматизированного оборудования с его последующей интеграцией в современное производство, комплексно использующего CAD/CAE-системы [1].

При очистке деталей термоимпульсным методом тепловому воздействию подвергаются как удаляемые элементы, так и вся деталь, поэтому необходимо обеспечить плавление удаляемых элементов и при этом исключить необратимые изменения как в материале, так и в конструкции деталей. Оптимизация режимов обработки экспериментальным путем представляет собой сложную задачу, сопряженную с рядом технических трудностей и материальных за-

трат, поэтому создание методик, ориентированных на применение методов математического моделирования и современных CAD/CAE-систем, представляет собой актуальную задачу.

**Описание решаемой задачи**

В ранее выполненных диссертационных работах А. В. Лосева [2] и А. А. Жданова [3] представлена физико-математическая модель процесса нагрева поверхностей деталей при термоимпульсной обработке, позволяющая моделировать различные режимы обработки при изменении характеристики источника тепла, свойств детонирующих газовых смесей, теплофизических свойств материалов, времени теплового воздействия и толщины нагреваемых элементов.

Мощность теплового источника характеризовалась величиной поверхностной плотности теплового потока, т.е. количеством теплоты, проходящим через заданную поверхность в единицу времени. Величина теплового потока при термоимпульсной обработке принималась равномерной и постоянной по всем поверхностям обрабатываемых деталей. Для расчета его величины использовалась зависимость:

$$q = \frac{Q_{\text{уд}} V_{\text{см}}}{F_{\Sigma} \tau},$$

где  $Q_{\text{уд}}$  – объемная теплота сгорания газовой смеси;  $V_{\text{см}}$  – объем смеси;  $F_{\Sigma}$  – суммарная площадь теплоотводящих поверхностей;  $\tau$  – время действия источника тепла.

В то же время объем горючей смеси зависит от объема рабочей камеры ( $V_{р.к.}$ ), её загрузки деталями ( $k_3$ ), давления ( $P_{см}$ ) и температуры ( $T_{см}$ ) газовой смеси и описывается следующей зависимостью:

$$V_{см} = \frac{V_{р.к.} k_3 P_{см} T_0}{T_{см} P_0}$$

Объемная теплота сгорания газовой смеси может быть определена по формуле:

$$Q_{уд} = \sum_{i=1}^N Q_i C_i,$$

где  $Q_i$ ,  $C_i$  – объемная теплота сгорания и доля  $i$ -го компонента газа в смеси.

В результате выражение для определения величины теплового потока принимало вид:

$$q = \frac{V_{р.к.} k_3 P_{см} T_0}{T_{см} P_0 F_{\Sigma} \tau} \sum_{i=1}^N Q_i C_i.$$

Согласно данной зависимости, мощность теплового источника может регулироваться давлением горючей смеси и зависит от объема рабочей камеры, степени её загрузки, удельной теплоты сгорания газовой смеси и её начальной температуры, суммарной площади теплоотводящих поверхностей.

Несмотря на универсальность, данная зависимость имеет несколько недостатков [4]. Она предполагает, что все выделившееся при горении тепло поглощается поверхностями, участвующими в теплообмене. Также она не учитывает физику процесса теплообмена при взаимодействии продуктов сгорания с материалом обрабатываемой детали и стенок камеры. Тепловой поток в этом случае можно представить в виде суммы двух составляющих – радиационной и конвективной.

Радиационный тепловой поток может быть определен по закону Стефана-Больцмана и зависит от температур поверхности детали и продуктов сгорания. Температура продуктов сгорания определяется составом топливной смеси и практически не зависит от ее начального давления.

Конвективная составляющая теплового потока также зависит от разности температуры поверхности детали и температуры продуктов сгорания. Кроме того, она зависит от коэффициента теплоотдачи, который, в свою очередь существенно зависит от скорости течения газа вблизи стенки. Поэтому для определения тепловых потоков, действующих на поверхности деталей при термоимпульсной обработке необходимо знать картину течения продуктов сгорания. Более точную картину распределения тепловых потоков можно получить в ходе совместного решения задачи расчета параметров течения в ходе рабочего цикла термоимпульсной обработки (включая сгорание топливной смеси и выпуск продуктов сгорания), и теплообмена между продуктами сгора-

ния и обрабатываемой деталью.

При термоимпульсной обработке детонирующими газовыми смесями основным параметром, определяющим эффективность процесса, является время затухания ударных волн в рабочей камере установки после детонации или теплового взрыва части топливной смеси [2, 3]. Это явление приводит к увеличению значений тепловых потоков, действующих на обрабатываемые детали, что позволяет производить удаление заусенцев, и даже части профиля шероховатости поверхности, несмотря на незначительное время действия ударных волн. К тому же они препятствуют осаждению окислов удаленных элементов обратно на поверхности деталей. Поэтому время затухания ударных волн представляет собой параметр, который определяет время обработки и должен быть учтен при выборе её режимов.

В настоящее время определение требуемых параметров термоимпульсной обработки становится невозможным без проведения расчетов при помощи программных комплексов для трехмерного газодинамического моделирования, что позволяет в значительной степени повышать точность дозирования энергии и сокращать количество требуемых предварительных испытаний.

### Описание применяемой математической модели и методики проведения численного исследования

Поскольку удаление заусенцев термоимпульсным методом происходит в результате их нагрева до высоких температур, вопросы теплопередачи являются ключевыми в исследованиях данного процесса. При этом особое внимание следует уделять зоне контакта твердого тела с газовой средой.

При создании математической модели были использованы 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  $k-\varepsilon$  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.

Рассматривалось детонационное сгорание неподвижной стехиометрической пропано-кислородной смеси в цилиндрической камере сгорания термоимпульсной установки Т-15 высотой 260 мм и диаметром 280 мм с искровым поджогом сверху камеры. Моделирование проводилось на основе модели скорости горения с применением подробного механизма реакций, что позволяет наиболее точно

описывать детонационное сгорание газовых смесей [6], а также адекватно моделировать процесс теплообмена между продуктами сгорания и деталями, расположенными в камере [7].

Расчет процесса теплообмена проводился с использованием программного пакета ANSYS CFX. При моделировании процессов переноса в пристеночной области использовался метод масштабируемых пристеночных функций Лаундера [8]. Преимуществом такого подхода является уход от ограничений по размерам расчетной сетки в пристеночной области.

Требованием при использовании различных моделей турбулентности является соблюдение в пристеночной области следующего условия:

$$y^+ \geq Y_{\text{ниж}}^+,$$

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

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

Для определения профиля температуры в пристеночном слое использовалось аналитическое решение Кадера [9]:

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

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

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

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

Исходя из этого выражения, можно получить 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  $\tilde{u}_\tau$  в пристеночном слое были использованы автоматически перестраиваемые пристеночные функции [10], получаемые смещением решений в формулировке вязкого подслоя и пристеночных функций с использованием значений плотности расчетной сетки. Для этой задачи наиболее хорошо подходит уравнение для определения удельной диссипации энергии турбулентности  $\omega$ , используемое в SST модели, так как оно имеет аналитическое решение как для вязкого подслоя, так и для логарифмического слоя. С его использованием определялась функция смещения с

учетом величины  $y^+$ .

Решения для  $\omega$  в вязком и логарифмическом пристеночном слое могут быть записаны в виде [10]:

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

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

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

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 область делилась на три части: стенки камеры, внутренний объем, заполненный топливной смесью, и деталь. При построении сетки применялись тетраэдрические элементы с размерами, уменьшающимися вблизи контакта детали и стенок камеры с газом, а также в зоне поджога горючей смеси.

Для более точного моделирования течений в пограничном слое вблизи поверхности детали и стенок камеры строились слои из призматических элементов. Размеры элементов вблизи поверхностей контакта газа с твердым телом задавались с учетом требований к величине  $y^+$  для применяемой модели турбулентности.

В настоящее время вычислительная газодинамика достигла больших успехов, и программные продукты позволяют решать задачи расчета теплообмена применительно к телам различной формы. Решение таких задач требует больших затрат машинного времени, поскольку результаты расчетов сильно зависят от структуры расчетной сетки, размеров расчетной области, входных параметров, особенностей алгоритма программы. В случае расчета параметров термоимпульсной обработки деталей сложной формы, имеющих большие площади поверхностей, данный метод, несмотря на свои преимущества, становится нерациональным, поскольку при этом увеличивается количество элементов конечно-элементной сетки, что, в свою очередь, приводит к значительному увеличению требуемых вычислительных ресурсов и времени.

В работе [11] предложен метод повышения численной эффективности моделирования процесса затухания ударных волн в камере сгорания термо-

импульсного оборудования, основанный на переходе от камеры с помещённой в неё деталью к пустой эквивалентной камере сгорания. Целью перехода являлось соблюдение геометрической эквивалентности, при которой объем топливной смеси в камере сгорания с учетом коэффициента заполнения деталями равнялся объему эквивалентной камеры сгорания. Также неизменной оставалась высота камеры для соблюдения одинаковой длины пробега ударных волн при их затухании. Несмотря на то, что результаты расчётов подтвердили высокую точность предложенного метода, он не предусматривает определение значений тепловых потоков, действующих на деталь, что является его существенным недостатком вследствие потребности проведения дополнительных расчётов.

Методика расчета тепловых потоков при термоимпульсной обработке с форкамерно-факельным поджогом, рассмотренная в работе [4], основана на определении значений осредненных тепловых потоков, действующих на поверхность камеры сгорания без наличия в ней каких-либо деталей. Однако результаты численного моделирования, проведенного в рамках рассматриваемой задачи, показывают, что данная методика не пригодна для случая термоимпульсной обработки детонирующими газовыми смесями, поскольку значения тепловых потоков, действующих на поверхность камеры гораздо меньше значений тепловых потоков, действующих на поверхность детали (рис. 1).

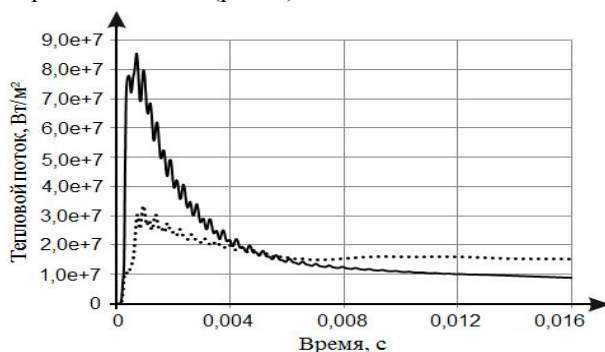


Рис. 1. Осредненный тепловой поток:  
 ..... — по поверхности пустой камеры,  
 — по поверхности детали

В данной работе предлагается усовершенствованный метод определения параметров термоимпульсной обработки, основанный на применении эквивалентной детали. Суть метода заключается в замене камеры сгорания с оригинальной деталью, имеющей сложную форму, точно такой же камерой с эквивалентной деталью простой формы (рис. 2). При этом объем детали остаётся неизменным с целью сохранения постоянства значения коэффициента заполнения камеры. Также эквивалентная деталь имеет такие же соотношения габаритных размеров,

что и оригинальная.

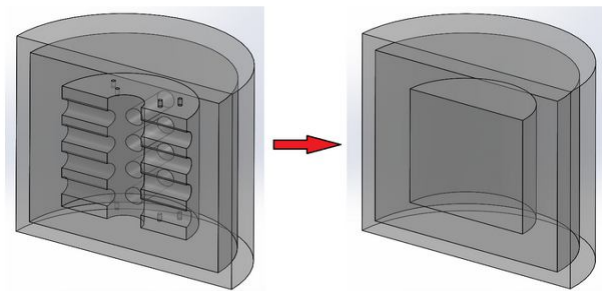


Рис. 2. Переход к камере сгорания с эквивалентной деталью

### Анализ результатов моделирования

Моделирование процессов теплообмена проводилось для случаев детонационного сгорания стехиометрической пропано-кислородной смеси при начальном давлении 15 бар. Целью численного исследования являлась сравнительная оценка двух параметров термоимпульсной обработки — времени затухания ударных волн и значений тепловых потоков, действующих в это время на поверхность детали, при переходе от камеры сгорания с оригинальной деталью к камере с эквивалентной деталью. Для подтверждения универсальности предложенного метода внутри камеры помещались детали различного объема, что соответствовало значениям коэффициента загрузки камеры в диапазоне 0,1 – 0,25.

На рисунке 3 представлены графики изменения давления по времени в камерах сгорания с оригинальной и эквивалентной деталями при коэффициенте загрузки камеры равным 0,1. Погрешность определения времени затухания ударных волн при переходе к камере с эквивалентной деталью составляет менее 1 %, поскольку графики в обоих случаях практически совпадают.

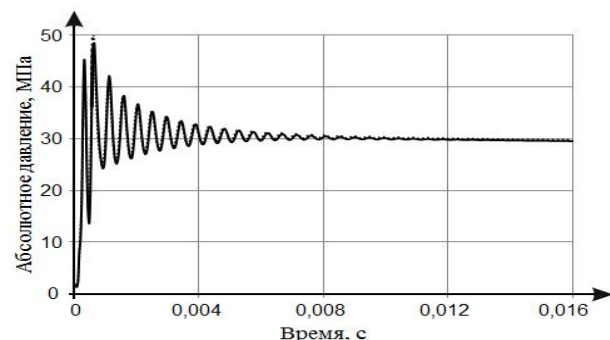


Рис. 3. Изменение давления по времени в рассматриваемых камерах:  
 ..... — камера с оригинальной деталью,  
 — камера с эквивалентной деталью

Значимым параметром термоимпульсной обработки являются значения действующих на поверхности деталей тепловых потоков, поскольку они определяют возможности обработки. В стационар-

ном режиме теплообмена и при одинаковых его условиях на всей поверхности тела количество передаваемого тепла в единицу времени прямо пропорционально площади поверхности теплообмена [12]. В случае же реального процесса при переходе от камеры сгорания с оригинальной деталью к камере с эквивалентной деталью значения тепловых потоков с некоторой погрешностью могут быть определены следующим образом:

$$q = q_{\text{ЭКВ}} \frac{S_{\text{КАМ}} + S_{\text{ЭКВ}}}{S_{\text{КАМ}} + S_{\text{Д}}},$$

где  $q_{\text{ЭКВ}}$  – осредненный по поверхности эквивалентной детали тепловой поток;  $S_{\text{КАМ}}$ ,  $S_{\text{ЭКВ}}$ ,  $S_{\text{Д}}$  – суммарные площади поверхностей камеры сгорания, эквивалентной и оригинальной деталей соответственно.

На рисунке 4 изображены графики изменения осредненного по поверхности детали теплового потока по времени для камеры сгорания с оригинальной деталью и пересчитанный по приведенной выше зависимости тепловой поток для камеры с эквивалентной деталью при коэффициенте загрузки камеры равным 0,2. Погрешность при этом составляет менее чем 3,1 %. Следует отметить нелинейный характер изменения величины теплового потока, а также его колебания, связанные с действием ударных волн после детонации газовой смеси.

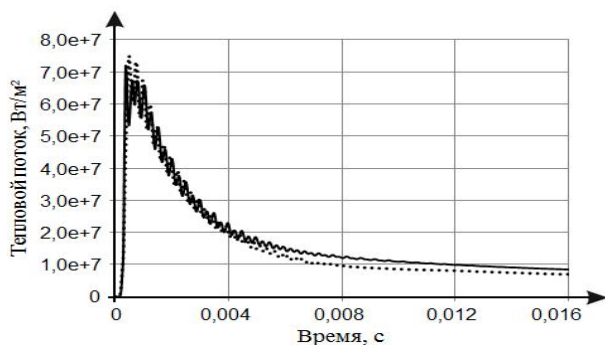


Рис. 4. Изменение осредненного по поверхности детали теплового потока по времени в рассматриваемых камерах:

..... – камера с оригинальной деталью,

— — пересчет по камере с эквивалентной деталью

Поскольку при помощи рассматриваемого способа обработки может производиться очистка различных по форме и размерам деталей, было важным в рамках данной работы оценить влияние коэффициента загрузки камеры сгорания на точность результатов моделирования согласно предложенной методики. Если относительная погрешность определения времени затухания ударных волн меняется незначительно и составляет порядка 1 %, то максимальная погрешность определения значений тепловых потоков составляет 6,8% (рис. 5). Однако ввиду сложности физико-химических процессов, происхо-

дящих при термоимпульсной обработке, данная погрешность считается вполне приемлемой. Поэтому можно утверждать, что предложенная методика может применяться для расчета параметров обработки.

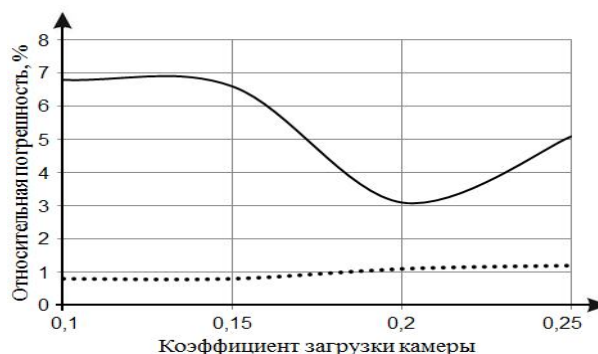


Рис. 5. Влияние коэффициента загрузки камеры на погрешность измеряемой величины:

..... – давление в камере сгорания,

— — тепловой поток, действующий на поверхность детали

Качественная оценка характера зависимости величины теплового потока от начального давления смеси также может быть проведена из следующих соображений. При рассмотрении теплового пограничного слоя для определения коэффициента теплоотдачи может быть использовано следующее выражение [12]:

$$\alpha(T_{\Gamma} - T_{\text{СТ}}) = \lambda \frac{\partial T}{\partial n} \approx \lambda \frac{(T_{\Gamma} - T_{\text{СТ}})}{\delta},$$

где  $\delta$  – толщина теплового пограничного слоя, которая, в свою очередь, обратно пропорциональна числу квадратному корню из числа Рейнольдса [12]:

$$\delta \sim \frac{1}{\sqrt{\text{Re}}} = \frac{1}{\sqrt{v_{\Gamma} \rho_{\Gamma} / \eta_{\Gamma}}}.$$

Для неизменной геометрии камеры масштаб длины является постоянной величиной. Вязкость продуктов сгорания в рассматриваемом диапазоне давлений и температур изменяется незначительно. Поэтому приближенно можно считать, что для рассматриваемого случая термоимпульсной обработки:

$$\delta \sim \frac{1}{\sqrt{\rho_{\Gamma}}}.$$

В таком случае с учетом зависимости  $\rho_{\Gamma} = p/R_{\Gamma}T_{\Gamma}$ , а также сравнительно слабой зависимости температуры продуктов сгорания от начального давления из данного выражения можно получить следующую оценку:

$$\alpha \sim \sqrt{p}.$$

Коэффициент повышения давления при сгорании газообразных топлив является практически постоянной величиной, что приводит к выводу о зависимости значения осредненного по поверхности

теплового потока от квадратного корня от начального давления [4]:

$$q_p = q_{p0} \sqrt{p/p_0}.$$

Для проверки применимости данного аналитического решения в случае детонационного сгорания топливной смеси сравнивались результаты моделирования данного процесса при начальном давлении в камере 15 бар со значениями, полученными при пересчете значений теплового потока по приведенной зависимости. Пересчет проводился с результатов моделирования процесса термоимпульсной обработки с начальным давлением в камере 12,5 бар.

Графики, представленные на рисунке 6, наглядно иллюстрируют пригодность данного вывода. Согласно полученным результатам зависимость изменения осредненного по поверхности детали теплового потока, действующего в период затухания ударных волн, описывается при помощи данного выражения с погрешностью не более 4,5 %, что делает его пригодным для расчета данного параметра термоимпульсной обработки.

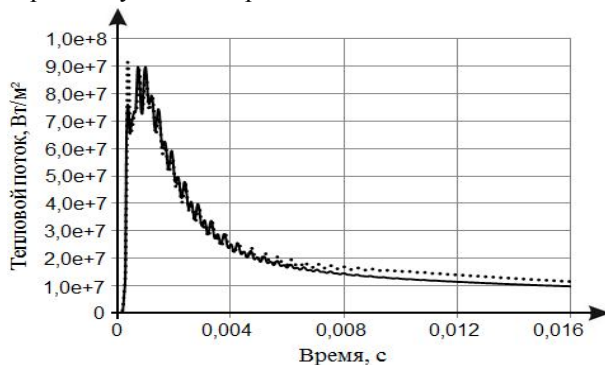


Рис. 6. Сравнение результатов численного и аналитического расчетов осредненного по поверхности детали теплового потока:  
 ..... – результаты моделирования,  
 ——— – результаты аналитического расчета

В конечном счете, значения тепловых потоков при термоимпульсной обработке для необходимого показателя начального давления в камере сгорания могут быть получены при помощи аналитического расчета с использованием данных численного моделирования для эквивалентной детали при заданном коэффициенте загрузки камеры по следующей зависимости:

$$q_p = q_{э\text{кв}} p_0 \sqrt{p/p_0} \frac{S_{\text{кам}} + S_{\text{э\text{кв}}}}{S_{\text{кам}} + S_{\text{д}}}.$$

Разница значений теплового потока при смене материала детали, связанная с изменением показателя теплопроводности, является незначительной, что делает данную методику еще более универсальной.

## Выводы

1. На основании анализа численных результатов исследований процессов горения и теплообмена для задач моделирования процессов термоимпульсной обработки детонирующими газовыми смесями обосновано использование модели скорости горения с применением подробного механизма реакций и SST модели турбулентности.

2. Предложен подход, позволяющий рассчитывать такие основные параметры термоимпульсной обработки, как время затухания ударных волн и тепловые потоки, действующие на обрабатываемые детали. Данный подход имеет высокую точность и при этом значительно сокращает машинные и временные затраты.

3. Для расчета тепловых потоков в случае термоимпульсной обработки детонирующими газовыми смесями предложен подход, основанный на моделировании теплообмена в камере сгорания с эквивалентной деталью для базового значения давления топливной смеси с возможностью пересчета для смесей с другими показателями начального давления при обработке деталей произвольной геометрической формы.

## Литература

1. Современное состояние и перспективы развития технологий финишной отделки прецизионных деталей летательных аппаратов [Текст] / С. И. Планковский, А. В. Лосев, О. В. Шипуль, О. С. Борисова // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2010. – № 2 (69). – С. 39–46.
2. Лосев, А. В. Повышение эффективности зачистки деталей пневматических и гидротопливных систем при использовании термоимпульсного метода [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 ; защита 14.05.1995 ; утв. 07.10.1995 / Лосев Алексей Васильевич. – Х., 1995. – 210 с.
3. Жданов, А. А. Термоимпульсные технологии очистки поверхностей деталей агрегатов авиационных двигателей [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.07.04 ; защищена 25.01.2003 ; утв. 12.03.2003 / Жданов Александр Андреевич. – Х., 2003. – 120 с.
4. Расчет тепловых потоков при термоимпульсной обработке с форкамерно-факельным поджогом [текст] / О. В. Шипуль, Е. В. Цегельник, В. Л. Малащенко, С. А. Красовский // *Открытые информационные и компьютерные технологии : сб. научных трудов Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»*. – 2013. – Вып. 62. – С. 89–97.
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. Влияние выбора моделей горения и механизмов реакций на достоверность прогнозирования перехода горения в детонацию [текст] / О. В. Шипуль, Д. А. Брега, А. А. Болоховец, Е. С. Палазюк //

Открытые информационные и компьютерные технологии : сб. научных трудов Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – 2013. – Вып. 63. – С. 160–169.

7. Моделирование теплообмена при затухании ударных волн в замкнутой камере [Текст] / С. И. Планковский, О. В. Шипуль, О. В. Трифонов, Е. С. Палазюк, В. Л. Малащенко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2014. – № 1 (108). – С. 104–109.

8. 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.

9. 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.

10. Menter, F. R. *Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications* [Text] / F. R. Menter // *AIAA-Journal*. – 1994. – № 32(8). – P. 269–289.

11. Трифонов, О. В. *Метод назначения режимов термоимпульсной обработки детонирующими газовыми смесями в интегрированных CAD/CAE-системах* [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.07 ; защищена 20.09.2013 ; утв. 21.11.2013 / Трифонов Олег Валерьевич. – Х., 2013. – 152 с.

12. *Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике* [Текст] / В. С. Авдудевский, Б. М. Галицкий, Г. А. Глебов и др. – М. : Машиностроение, 1992. – 528 с.

Поступила в редакцию 1.09.2014, рассмотрена на редколлегии 19.11.2014

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

## МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ТЕПЛОВИХ ПОТОКІВ ПРИ ТЕРМОІМПУЛЬСНІЙ ОБРОБЦІ ДЕТОНУЮЧИМИ ГАЗОВИМИ СУМІШАМИ

**С. І. Планковський, О. В. Шипуль, Є. С. Палазюк, С. О. Красовський**

Запропоновано методику розрахунку теплових потоків при термоімпульсній обробці детонуючими газовими сумішами. Для моделювання процесу теплообміну між продуктами згоряння і деталями, розташованими в камері, використано модель швидкості горіння із застосуванням докладного механізму реакцій та SST модель турбулентності. Для зменшення обчислювальних витрат запропоновано використовувати моделювання згоряння з урахуванням теплообміну для камери з еквівалентною деталлю простої форми. Показано, що використання такого підходу дозволяє розраховувати час затухання ударних хвиль і осереднені теплові потоки для довільного тиску суміші і геометричної форми деталі за результатами моделювання для базового тиску суміші в еквівалентній камері. В ході численних експериментів підтверджено, що запропонована методика має достатню точність для застосування при розрахунку режимів термоімпульсної обробки.

**Ключові слова:** термоімпульсна обробка, математичне моделювання, тепловий потік, затухання ударних хвиль, еквівалентна деталь.

## CALCULATION METHOD OF THE HEAT FLUXES DURING THERMAL-PULSE TREATMENT BY DETONATING GASEOUS MIXTURES

**S. I. Plankovskyy, O. V. Shypul, E. S. Palaziuk, S. O. Krasovskyy**

Calculation method of the heat fluxes during thermal-pulse treatment by detonating gaseous mixtures is offered. For heat transfer simulation between the combustion products and parts, located in the chamber, the burning velocity model with detailed mechanism of reactions and the SST turbulence model are using. To reduce computational costs combustion modeling considering heat exchange for the chamber with equivalent part with simple shape is proposed to use. It is shown that using this approach allows calculating the time of the shock waves damping and averaged heat fluxes for arbitrary pressure of the mixture and geometric shape of the part by the results of simulation for base pressure of the mixture in the equivalent camera. Numerical experiments are confirmed that proposed method has a sufficient accuracy for using in the calculation of thermal-pulse treatment modes.

**Keywords:** thermal-pulse treatment, mathematical simulation, heat flux, shock waves damping, equivalent part.

**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.

**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.

**Красовский Сергей Александрович** – аспирант кафедры технологии производства летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: everlast.s@mail.ru.