

## Методика выбора параметров форкамеры для термоимпульсной обработки деталей из пластмасс

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

Показано, что для качественной термоимпульсной обработки изделий из пластмасс необходимо обеспечить подавление детонации для уменьшения величины тепловых потоков и равномерность температуры продуктов сгорания в камере. Выполнение таких требований по равномерности температур в камере термоимпульсной установки возможно при использовании форкамерно-пламенного поджога топливной смеси. Разработана методика выбора геометрических параметров форкамеры, обеспечивающих заданную степень равномерности температур в основной камере установки для термоимпульсной обработки пластмасс. Методика основана на проведении численных экспериментов с использованием подробного механизма горения. Показано, что при варьировании геометрических размеров и количества отверстий перетекания разброс температур может быть уменьшен до величины меньшей 1% от средней температуры в камере.

**Ключевые слова:** термоимпульсная обработка пластмасс, детонация, математическое моделирование, поле температур, форкамерный поджог

### Введение

При термоимпульсной отделке и очистке детонирующими газовыми смесями основное влияние на процесс обработки имеет период затухания ударных волн в камере после детонации части топливной смеси [1, 2]. Тепловые потоки в это время могут достигать величины порядка  $10^8$  Вт/м<sup>2</sup> [3].

Для легкоплавящихся материалов, таких как пластмассы, столь большие величины тепловых потоков являются чрезмерными в большом числе случаев. Кроме того, для таких изделий характерны требования сохранения эстетического качества поверхности после обработки – отсутствие потёков, копоти, коробления и т.п.

Для обработки в термоимпульсных машинах характерна групповая обработка деталей. Это приводит к трудностям, связанным с неоднородностью поля температур после сгорания топливной смеси. Такая неравномерность вызвана с эффектом Махе – разогревом продуктов сгорания за счет адиабатического сжатия [4].

При точечном поджоге топливной смеси разница температур продуктов сгорания в различных точках камеры может достигать 500 К. При прохождении ударных волн в камере образуются вихревые структуры, перемешивающие газ и выравнивающие его температуру. Однако избежать проявления эффекта Махе избежать не удастся.

При обработке изделий из пластмасс неравномерность температуры и, как следствие тепловых потоков, может привести к ситуации, когда в одной части камеры обработка ведется с нужным качеством, а в другой образуется брак. Поэтому для обработки пластмасс равномерность поля температур в камере термоимпульсной установки имеет первоочередное значение.

Возможным вариантом решения этой задачи является использование форкамерно-факельного зажигания. Такие системы успешно применяются на стационарных генераторах, работающих на природном газе. До настоящего времени

применительно к задачам термоимпульсной обработки исследований, посвященных особенностям применения форкамерно-факельного поджога, не проводилось.

В связи с этим целью настоящей работы была разработка методики выбора геометрических параметров форкамеры, обеспечивающих заданную степень равномерности температур в основной камере установки для термоимпульсной обработки пластмасс.

### Описание использованной математической модели

Для описания процессов, происходящих в камере термоимпульсной машины, будем использовать модель многокомпонентного течения реагирующих газов, предложенную в работах [5, 6].

Она включает систему уравнений Навье–Стокса и стандартные правила смешения для вычисления плотности, давления, энтальпии и газовой постоянной. Для расчета состава смеси применяется уравнение концентрации.

Зависимости плотности, вязкости, теплопроводности, удельных теплоемкостей, коэффициентов диффузии компонентов от температуры задавались уравнениями состояния и эмпирическими уравнениями.

Для вычисления турбулентной вязкости и теплопроводности использовалась SST-модель турбулентности.

Уравнения баланса реагентов при горении предварительно перемешанной топливной смеси будет иметь вид

$$\rho \frac{\partial(Y_j)}{\partial t} + \rho u_i \frac{\partial(Y_j)}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \rho D \frac{\partial Y_j}{\partial x_i} \right) = \rho \sum_{n=1}^N \nu_{jn} R_n, \quad (1)$$

где  $Y_j$  – содержание реагента  $j$ ;  $u_i$  – скорость смеси в направлении  $i$ ;  $\nu_{jn}$  – стехиометрический коэффициент реагента  $j$  в реакции  $n$ ;  $N$  – суммарное количество реакций;  $R_n$  – скорость реакции  $n$ .

При возникновении детонации в уравнение прогресса реакции добавлялся дополнительный источниковый член. Величина этой составляющей определялась как скорость реакции при детонации.

Механизм горения метана, который использовался при моделировании, основывается на полном кинетическом механизме, который состоит из 325 элементарных реакций и включает в себя 53 реагента. После подробного сокращения полный механизм реакции горения метана можно сократить до 52 элементарных реакций, включающих 19 реагентов, с сохранением требуемой точности [7]. Список элементарных реакций для механизма горения метана приведен в таблице 1.

Для определения констант прямых и обратных реакций используется температурные зависимости Аррениуса [8]:

$$F_k = A_{k1} T^{\beta_{k1}} \exp\left(-\frac{E_k}{RT}\right), \quad (2)$$

$$B_k = A_{k2} T^{\beta_{k2}} \exp\left(-\frac{E_k}{RT}\right), \quad (3)$$

где  $A_k$ ,  $\beta_k$  – эмпирические коэффициенты;  $E_k$  – энергия активации.

Для оценки качества формирования обрабатывающей среды (для случая

термоимпульсной обработки – распределения температуры продуктов сгорания) необходимо ввести в рассмотрение дополнительные количественные критерии. Такие критерии могут быть построены на основе функций распределения.

Таблица 1

Примененный при моделировании механизм реакции горения метан-воздух

1	$CH_3+H+M \rightleftharpoons CH_4+M$	27	$HCO+O \rightleftharpoons CO_2+H$
2	$CH_3+OH \rightleftharpoons CH_2+H_2O$	28	$HCO+O_2 \rightleftharpoons HO_2+CO$
3	$CH_3+H \rightleftharpoons CH_2+H_2$	29	$CO+O+M \rightleftharpoons CO_2+M$
4	$CH_2+H \rightleftharpoons CH+H_2$	30	$CO+OH \rightleftharpoons CO_2+H$
5	$CH_2+OH \rightleftharpoons CH_2O+H$	31	$CO+O_2 \rightleftharpoons CO_2+O$
6	$CH_2+OH \rightleftharpoons CH+H_2O$	32	$HO_2+CO \rightleftharpoons CO_2+OH$
7	$CH+O_2 \rightleftharpoons HCO+O$	33	$H_2+O_2 \rightleftharpoons 2OH$
8	$CH+O \rightleftharpoons CO+H$	34	$OH+H_2 \rightleftharpoons H_2O+H$
9	$CH+OH \rightleftharpoons HCO+H$	35	$H+O_2 \rightleftharpoons OH+O$
10	$CH+CO_2 \rightleftharpoons HCO+CO$	36	$O+H_2 \rightleftharpoons OH+H$
11	$CH_2+CO_2 \rightleftharpoons CH_2O+CO$	37	$H+O_2+M \rightleftharpoons HO_2+M$
12	$CH_2+O \rightleftharpoons CO+H+H$	38	$OH+HO_2 \rightleftharpoons H_2O+O_2$
13	$CH_2+O \rightleftharpoons CO+H_2$	39	$H+HO_2 \rightleftharpoons 2OH$
14	$CH_2+O_2 \rightleftharpoons CO_2+H+H$	40	$O+HO_2 \rightleftharpoons O_2+OH$
15	$CH_2+O_2 \rightleftharpoons CH_2O+O$	41	$2OH \rightleftharpoons O+H_2O$
16	$CH_2+O_2 \rightleftharpoons CO_2+H_2$	42	$H+H+M \rightleftharpoons H_2+M$
17	$CH_2+O_2 \rightleftharpoons CO+H_2O$	43	$H+H+H_2 \rightleftharpoons H_2+H_2$
18	$CH_2+O_2 \rightleftharpoons CO+OH+H$	44	$H+H+H_2O \rightleftharpoons H_2+H_2O$
19	$CH_2+O_2 \rightleftharpoons HCO+OH$	45	$H+H+CO_2 \rightleftharpoons H_2+CO_2$
20	$CH_2O+OH \rightleftharpoons HCO+H_2O$	46	$H+OH+M \rightleftharpoons H_2O+M$
21	$CH_2O+H \rightleftharpoons HCO+H_2$	47	$H+O+M \rightleftharpoons OH+M$
22	$CH_2O+M \rightleftharpoons HCO+H+M$	48	$H+HO_2 \rightleftharpoons H_2+O_2$
23	$CH_2O+O \rightleftharpoons HCO+OH$	49	$HO_2+HO_2 \rightleftharpoons H_2O_2+O_2$
24	$HCO+OH \rightleftharpoons CO+H_2O$	50	$H_2O_2+M \rightleftharpoons OH+OH+M$
25	$HCO+M \rightleftharpoons H+CO+M$	51	$H_2O_2+H \rightleftharpoons HO_2+H_2$
26	$HCO+H \rightleftharpoons CO+H_2$	52	$H_2O_2+OH \rightleftharpoons H_2O+HO_2$

Функцию распределения будем строить следующим образом. По оси  $X$  будем откладывать значения температуры продуктов сгорания в момент окончания горения. Диапазон между минимальным и максимальным значением температуры в камере  $T_{2min}$  и  $T_{2max}$  разобьем на  $N$  интервалов. В качестве групповых частот будем использовать величину относительного объема камеры, в котором значение температуры находится между величинами  $T_{2i}$  и  $T_{2k}$ .

Для оценки степени однородности смеси будем использовать функции, определяющие математическое ожидание и среднее квадратичное отклонение  $T_2$

$$MT_2 = \frac{\sum \bar{V}_{kk} T_{2k}}{N}, \quad (4)$$

$$\sigma T_2 = \sqrt{DT_2} = \sqrt{\frac{\sum (T_{2k} - MT_2)^2 \bar{V}_k}{N}}. \quad (5)$$

Температуру продуктов сгорания будем считать соответствующей требова-

ниям термоимпульсной обработки, если  $T_2$  находится внутри диапазона  $T_2 = [T_2] \pm 0,03[T_2]$ .

### **Влияние способа поджога смеси на характер сгорания газовой смеси**

Как уже было сказано, для случая термоимпульсной обработки пластмасс продуктами сгорания газовых смесей необходимо обеспечить два условия:

- подавление детонации для уменьшения величины тепловых потоков;
- равномерность температуры продуктов сгорания в камере.

Известны способы подавления детонации в газовых смесях, основанные на добавлении инертных частиц, тяжелых углеводородов, специальных присадок [8, 9]. Однако даже при устранении детонации таким способом при использовании точечного электроискрового зажигания невозможно устранить значительный (до 20%) разброс температур в камере, вызванный эффектом Махе.

Для обеспечения равномерности температур в камере необходимо использовать другие способы поджога топливной смеси.

Известны работы по созданию систем объемного поджога на основе химического пробоя топливной смеси коронным разрядом (технология Advanced Corona Ignition System (ACIS) [10]). В сравнении с локализованным в миллиметровом зазоре искровым разрядом размер пульсирующей высокочастотной короны в камере может задаваться произвольно. В системе зажигания фирмы Etatech, удалось добиться стабильного образования в камере 18-сантиметрового коронного разряда, что практически соответствует размерам камер термоимпульсных машин.

Химический пробой происходит практически одновременно во всем объеме камеры, что сокращает период сгорания смеси до 100...200 мкс. В настоящее время проводятся испытания системы, но конкретные сроки внедрения не называются. Поэтому система поджога на основе коронного разряда, несмотря на свою перспективность для использования при термоимпульсной обработке легкоплавких материалов, в настоящей работе не рассматривалась.

Другим возможным вариантом выравнивания температуры продуктов сгорания может быть многоточечный поджог лазерным излучением. В настоящее время системы лазерного поджога активно разрабатываются применительно к автомобильным двигателям. Однако и эти системы остаются на уровне экспериментальных образцов.

Поэтому практически единственным вариантом решения задачи является использование форкамерно-факельного зажигания. Принцип работы форкамерно-факельного зажигания заключается в предварительном запале небольшого количества топлива в форкамере с последующим воспламенением смеси через отверстия в её корпусе.

В основной камере горение инициируется в значительной части объема, что приводит к ускорению сгорания топлива и должно привести к выравниванию температуры продуктов сгорания.

С применением описанной модели рассматривалось сгорание метановоздушных смесей. В ходе численного моделирования изучалось влияние конфигурации отверстий перетекания из форкамеры в рабочую камеру на равномерность температуры продуктов сгорания. Кроме того фиксировался переход сгорания топливной смеси из дефлаграционного в детонационный режим.

### Анализ результатов моделирования

Моделирование проводилось для определения геометрических параметров форкамеры, которая располагалась по центру рабочей камеры. При моделировании варьировались диаметры отверстий перетекания, их количество и углы расположения относительно оси камеры.

При построении расчетной сетки конечных элементов обеспечивалось сгущение сетки в области отверстий перетекания, в области поджога смеси и в зоне возможного возникновения детонации (рис. 1).

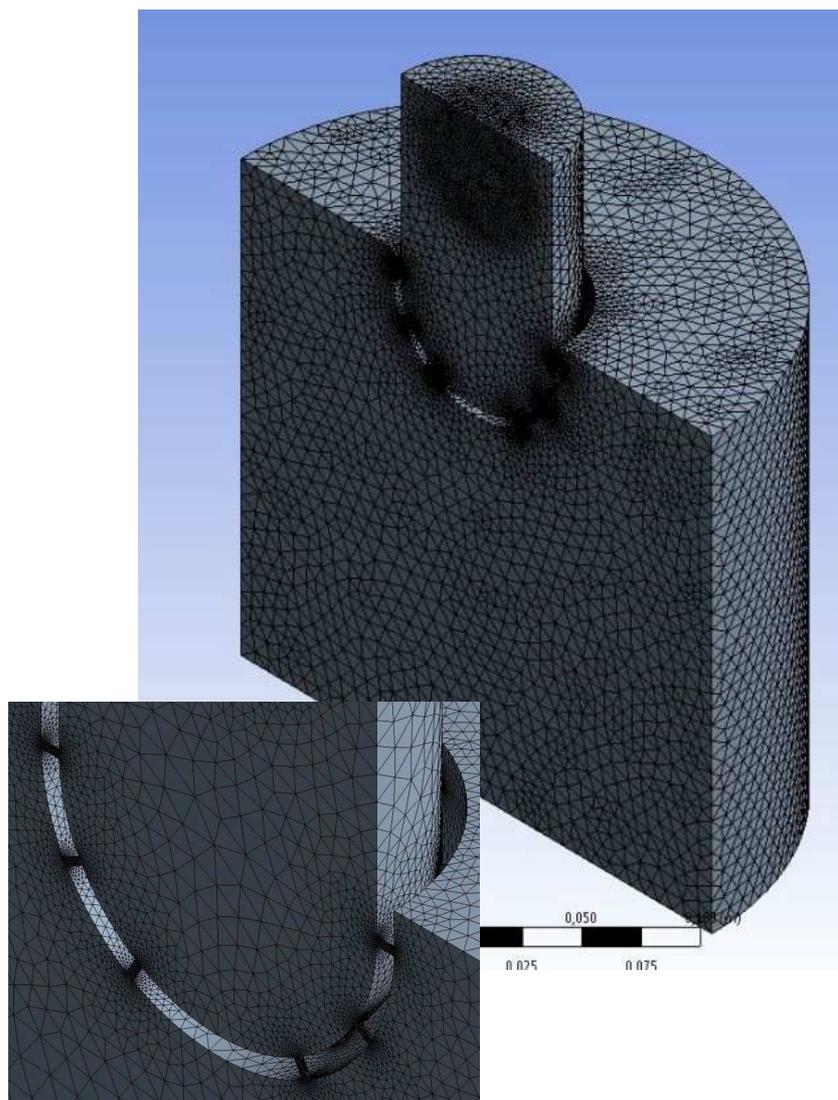


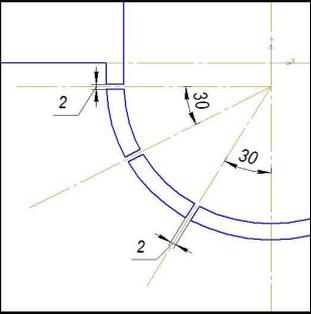
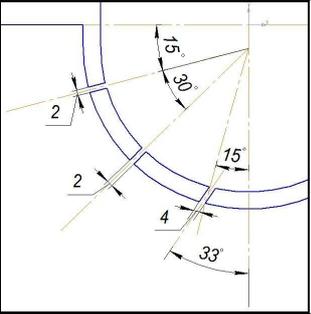
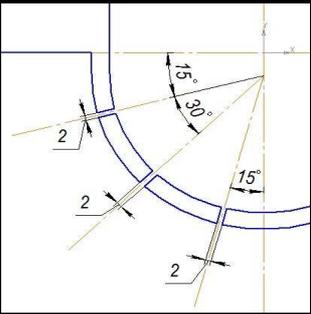
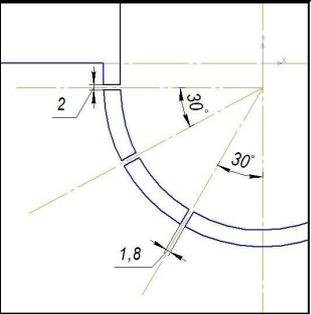
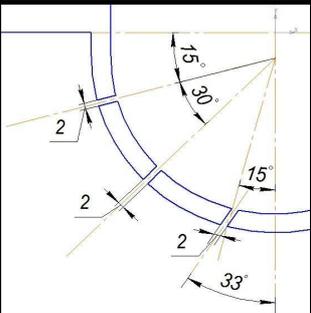
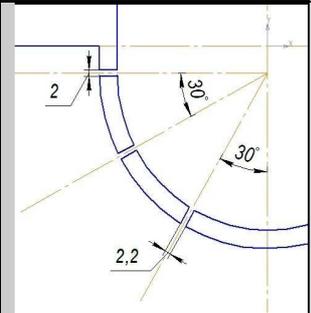
Рис. 1. Расчетная сетка конечных элементов для задачи проектирования форкамеры

Использование интегрированного подхода, объединяющего модуль геометрического моделирования, генератор сетки и препроцессор, позволило автоматически перестраивать расчетную сетку при изменении геометрических параметров модели, что существенно сократило общее время проведения численного эксперимента.

Результаты моделирования представлены в таблице 2. Приведены данные о средней температуре в рабочей зоны камеры термоимпульсной машины и среднеквадратичном отклонении температуры. Для одного варианта конфигураций отверстий перетекания (4 в камере произошла детонация. В остальных случаях ее удалось избежать.

Таблица 2

Результаты моделирования для различных отверстий перетекания

№	Конфигурация отверстий перетекания	$T_{сред}, K$	$\sigma T_2, \%$	№	Конфигурация отверстий перетекания	$T_{сред}, K$	$\sigma T_2, \%$
1	2	3	4	1	2	3	4
1		2672	1,64	4		2795 (Д)	5,11
2		2647	3,53	5		2706	1,72
3		2678	7,46	6		2636	0,88

Для конфигурации отверстий перетекания 6 варианта равномерность распределения температуры оказалась наибольшей – среднеквадратичное отклонение составило всего 0,88% при средней температуре 2636 К. Этот вариант был рекомендован для использования на установке Т-15 при термоимпульсной обработке изделий из пластмасс.

Анализ результатов моделирования иллюстрируют механизм, за счет которого происходит изменение характера горения рабочей смеси при правильно подобранных параметрах форкамеры. Концентрация перекисей в рабочей камере резко возрастает еще до проникновения внутрь фронта горения. После проникновения пламени через отверстия перетекания реализуется практически объемное

сгорание топливной смеси, что минимизирует эффект Махе и позволяет добиться высокой равномерности температуры.

Без форкамеры переход к детонационному режиму сгорания наблюдался для всех смесей, начальное давление которых превышало 0,2 МПа.

При этом наблюдался ярко выраженный эффект Махе со среднеквадратичным отклонением температур более 5%.

### Выводы

1. Для качественной термоимпульсной обработки изделий из пластмасс необходимо обеспечить подавление детонации для уменьшения величины тепловых потоков и равномерность температуры продуктов сгорания в камере.

2. Численное моделирование сгорания метано-воздушной смеси при искровом поджоге показало, что частичная детонация происходит для смесей с давлением более 0,2 МПа. При этом наблюдался выраженный эффект Махе со среднеквадратичным отклонением температур более 5%.

3. Выполнение требований по равномерности температур в камере возможно при использовании форкамерно-пламенного поджога топливной смеси. Предложена методика выбора геометрических параметров форкамеры для термоимпульсной установки. Методика основана на проведении численных экспериментов с использованием подробного механизма горения.

4. Показано, что при варьировании геометрических размеров и количества отверстий перетекания разброс температур может быть уменьшен до величины меньшей 1% от средней температуры в камере.

### Список литературы

1. Жданов, А.А. Термоимпульсные технологии очистки поверхностных деталей агрегатов авиационных двигателей [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.07.04 / Александр Андреевич Жданов. – Х., 2003. – 120 с.

2. Лосев, А.В. Повышение эффективности зачистки деталей пневматических и гидротопливных систем при использовании термоимпульсного метода [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / Алексей Васильевич Лосев. – Х., 1995. – 210 с.

3. Gillespie, L.K. Deburring and edge finishing handbook [Текст] / L.K. Gillespie. – New York City: Industrial Press, 1999. – 404 p.

4. Gillespie, L.K. Formation and properties of machining burr. ASME Transactions [Текст] / L.K. Gillespie, P.T. Blotter // Journal of Engineering for Industry. – 1976. – Vol. 98. – No. 1. – P. 66 – 74.

5. Адонин, С.М. О теплопередаче продуктов детонации газовой смеси в камере [Текст] / С.М. Адонин, В.И. Манжалей // Динамика сплошной среды. – Новосибирск, 1986. – Вып. 74. – С. 3 – 10.

6. Манжалей, В.И. Затухание ударных волн после детонации газа в камере [Текст] / В.И. Манжалей // Гидродинамика взрыва. – Новосибирск, 1986. – Вып. 78. – С. 142 – 153.

7. Иванов, К.В. Детонационные волны в смесях с повышенным начальным давлением [Электронный ресурс] / К.В. Иванов, С.В. Головастов // 50-я научная конференция МФТИ. Секция физики высоких плотностей энергий: тез. докл. науч. конф., 23 ноября 2007 г. – М., 2007. – 5 с. – Режим доступа к документу: [http://mipt.ru/nauka/conf\\_mipt/conf50/plen\\_sections/fpfe/FVPE/Ivanov.html](http://mipt.ru/nauka/conf_mipt/conf50/plen_sections/fpfe/FVPE/Ivanov.html).

8. Пак, Н.И. Численное моделирование процесса термического удаления заусенцев концентрированным потоком энергии [Текст] / Н.И. Пак, С.А. Шикинов // Об-

работка материалов импульсными нагрузками. – Новосибирск, 1990. – С. 168 – 175.

9. Лосев, А.В. Расчет температурного поля пластины при её местном нагреве [Текст] / А.В. Лосев, Б.А. Колоколов, С.Ф. Мещеряков // Обработка металлов давлением в машиностроении. – Х.: ХАИ. – 1981. – Вып. 17. – С. 49 – 54.

10. Лосев, А.В. Теоретический анализ термоимпульсного удаления заусенцев с деталей [Текст] / А.В. Лосев // Импульсная обработка металлов давлением. – Х.: ХАИ. – 1997. – С.43 – 49.

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

Поступила в редакцию 15.11.2013

## **Методика вибору параметрів форкамери для термоімпульсної обробки деталей з пластмас**

Показано, що для якісної термоімпульсної обробки виробів із пластмас необхідно забезпечити придушення детонації для зменшення величини теплових потоків і рівномірність температури продуктів згоряння в камері. Виконання таких вимог по рівномірності температур в камері термоімпульсної установки можливо при використанні форкамерно-полум'яного підпалу паливної суміші. Розроблено методику вибору геометричних параметрів форкамери, яка забезпечує задану ступінь рівномірності температур в основній камері установки для термоімпульсної обробки пластмас. Методика заснована на проведенні чисельних експериментів з використанням докладного механізму горіння. Показано, що при варіюванні геометричних розмірів і кількості отворів перетікання розкид температур може бути зменшений до величини меншої 1% від середньої температури в камері.

**Ключові слова:** термоімпульсна обробка пластмас, детонація, математичне моделювання  $\tau$  ня, поле температур, форкамерний підпал

## **Methodology for the selection parameters of pre-chamber for thermal-impulse treatment of plastic parts**

It is shown that for quality thermal-impulse treatment of plastic parts is necessary to provide the suppression of detonation to reduce the value of heat flow and temperature uniformity of products of combustion in the chamber. The implementation of such requirements for temperature uniformity in the chamber thermal-impulse machine possible using the pre-chamber-flame burning of the fuel mixture. Developed a methodology for selection pre-chamber geometry to provide the desired degree of uniformity of temperature in the main chamber machine for thermal-impulse treatment of plastics. Methodology is based on numerical experiments using a detailed mechanism of combustion. It is shown that by varying the geometry and number of holes flow temperature variation can be reduced to a value less than 1% of the average temperature in the chamber.

**Keywords:** thermal-impulse treatment of plastic parts, detonation, numerical simulation, field of temperatures, pre-chamber arson