

## Моделирование горения газовых смесей в замкнутой камере сгорания энергоприводов импульсного оборудования

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

Проведено моделирование горения в замкнутой цилиндрической камере постоянного объема с учетом перехода процесса сгорания топливной смеси из дефлаграционного в детонационный режим с формированием ударных волн (УВ). Исследованы особенности горения в замкнутом объеме. Получены зависимости времени затухания УВ и массы газа, сгоревшего в режиме теплового взрыва от начального давления в камере.

**Ключевые слова:** модель скорости горения, подробный механизм окисления, детонация, переход горения в детонацию, ударная волна, тепловой взрыв, математическое моделирование.

### 1. Введение

Разработка и создание ресурсосберегающих технологий и оборудования с высоким КПД – одна из наиболее актуальных задач современности. К такого рода технологиям относятся методы, которые используют энергию импульсных тепловых приводов, источником которой является горючий газ. Импульсные машины благодаря их высокопроизводительности, экономичности и простоты в эксплуатации нашли широкое применение в машиностроении для операций термоимпульсной обработки, резки, штамповки, брикетирования и прочих методов металлообработки.

Вопросу проектирования тепловых энергоприводов уделено достаточно много внимания [1], но существующие на сегодня методы имеют существенные ограничения, которые не учитывают особенностей смесеобразования и горения в замкнутых камерах и имеют более теоретический характер. Поэтому создание новых методов проектирования импульсных энергоприводов на основе современных CAD/CAE-систем представляет собой актуальную задачу.

### 2. Горение в замкнутом объеме

При горении происходит преобразование химической энергии топливной смеси в тепловую энергию продуктов сгорания. При адиабатическом горении температура продуктов реакции зависит только от суммарного теплового эффекта и теплоемкости образовавшихся продуктов и не зависит от скорости реакций в пламени. Эта величина называется адиабатической температурой горения  $T_g$  [2]. Это очень важная характеристика всех топлив. У большинства промышленных горючих смесей величина  $T_g$  лежит в пределах 1500...3000 К.

Д. А. Франк-Каменецкий и Я. Б. Зельдович разработали тепловую теорию горения. Согласно этой теории пламя распространяется путем теплопередачи от продуктов горения к свежей смеси. Схема передачи теплоты показана на рис. 1.

Зона, в которой наиболее активно протекает реакция горения, называется фронтом пламени [2]. Температурные границы этой зоны определяются температурой самовоспламенения  $T_{cv}$  и температурой продуктов реакции  $T_r$  сразу после выгорания смеси.

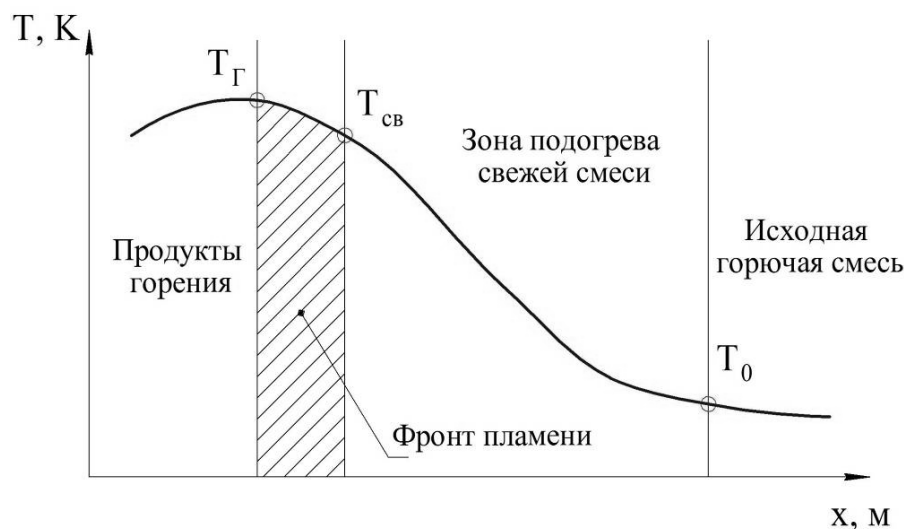


Рис. 1. Распределение температур в газовой смеси

Перед фронтом пламени находится свежая смесь, а позади – продукты реакции. Предполагается, что в зоне подогрева смеси скорость протекания реакции очень мала, и выделением теплоты пренебрегают.

При стационарном распространении пламени, теплопередача между слоями газа не приводит к каким-либо теплотерям и понижению температуры продуктов горения непосредственно за фронтом пламени. Это объясняется тем, что теплоотвод из сгорающего слоя смеси при поджоге соседнего компенсируется таким же количеством теплоты, полученным ранее для собственного возгорания. Продукты сгорания могут терять теплоту только посредством излучения, а также в результате теплообмена со стенками камеры.

Таким образом, глобально процесс распространения пламени при точечном поджоге выглядит следующим образом: инициирование горения приводит к нагреву близлежащего слоя до температуры воспламенения. Сгорание этого слоя приводит к воспламенению соседнего и так до полного сгорания топливной смеси с образованием устойчивого фронта пламени.

При горении газов в открытом пространстве продукты реакции могут свободно расширяться, при этом давление практически не изменяется. При сгорании в замкнутой камере стенки сосуда препятствуют свободному расширению газов и вся теплота химической реакции идет только на увеличение внутренней энергии при этом процесс сопровождается ростом давления.

При адиабатическом горении в замкнутом объеме в результате повышения температуры от  $T_0$  до температуры горения  $T_{bv}$  давление возрастает от  $P_0$  до  $P_{bv}$  [2]:

$$P_{bv} = \frac{P_0 \cdot T_{bv}}{T_0} \cdot \frac{n}{m}, \quad (1)$$

где  $m$ ,  $n$  – число молей вещества до и после сгорания стехиометрической топливной смеси.

При дефлаграционном горении коэффициент повышения давления составляет 7...10, при взрывном сгорании или детонации – намного выше.

Если экзотермическая реакция горения прошла до полного своего завершения равномерно по всему объему камеры и при этом теплоотвод через стенки был незначительным, то исходя из равенства начальной полной внутренней энергии

топливной смеси  $E_1$  и внутренней энергии продуктов горения  $E_2$ , можно рассчитать температуру продуктов горения в  $T_{bv}$  [2]:

$$E_1(T_0) = E_2(T_{bv}), \quad (2)$$

где

$$E_1 = \int_0^T c_v dT + Qa_0; \quad E_2 = \int_0^T c_v dT; \quad (3)$$

$Q$  – тепловой эффект реакции;

$a_0$  – концентрация горючего вещества;

$T_0$  – начальная температура смеси;

$c_v$  – теплоемкость при постоянном объеме.

Если предположить, что  $c_v = \text{const}$ , то температуру продуктов горения можно определить по следующему выражению:

$$T_{bv} = T_0 + Qa_0 / c_v. \quad (4)$$

Проведем сравнение рассчитанной температуры с температурой горения в открытом пространстве  $T_b$ , т. е. в условиях постоянного давления. В этом случае температура горения  $T_b$  определяется из условия равенства начальной полной энтальпии топливной смеси и энтальпии продуктов горения [2]:

$$H_1(T_0) = H_2(T_b), \quad (5)$$

$$H_1(T_0) = \int_0^{T_0} c_p dT + Qa_0; \quad H_2(T_b) = \int_0^{T_b} c_p dT, \quad (6)$$

где  $c_p$  – теплоемкость при постоянном давлении.

При условии  $H=E+PV$  выражение (2.11) примет вид:

$$E_1(T_0) = E_2(T_b) + P(V_2 - V_1). \quad (7)$$

Из уравнения (7) видно, что в случае постоянного давления внутренняя энергия топливной смеси расходуется на увеличение внутренней энергии продуктов горения и на работу расширения. Ввиду того, что  $V_2 > V_1$ ,  $T_{bv} > T_b$ .

Если предположить, что  $c_p = \text{const}$ , то температура горения при постоянном давлении такова:

$$T_b = T_0 + Qa_0 / c_p, \quad (8)$$

$$\frac{T_{bv} - T_0}{T_b - T_0} = \frac{c_p}{c_v} = k > 1, \quad (9)$$

где  $k$  – показатель адиабаты.

Определим среднюю температуру по объему камеры, которая достигается после сгорания части горючего:

$$\bar{T} = T_0 + \frac{Q}{c_v}(a_0 - a), \quad (10)$$

где  $a$  – текущее значение концентрации горючего;

$$\frac{\bar{T} - T_0}{T_{bv} - T_0} = \eta = 1 - \frac{a}{a_0}, \quad (11)$$

где  $\eta$  – доля выгоревшего вещества

Из уравнения состояния рассчитаем текущее среднее значение давления в камере:

$$P = \frac{MR}{V_0} [T_0 + \eta(T_{bv} - T_0)] \quad (12)$$

где  $V_0$  – объем сосуда;

$M$  – масса смеси.

Как следует из уравнения (12), среднее давление в камере линейно зависит от доли выгоревшего вещества.

Отличительной особенностью горения в замкнутой камере является неравномерное распределение температуры продуктов реакции после сгорания. При инициации горения с помощью какого-либо источника зажигания скорость выгорания топливной смеси определяется скоростью распространения пламени. При этом, вследствие того, что скорость горения гораздо меньше скорости звука, давление в каждый момент времени успевает выровняться по всему объему камеры. Условно говоря, горение в каждый момент времени происходит в тонком слое, называемом фронтом пламени, который имеет конечную толщину. Поочередно реагирует один слой за другим, и такое горение называют послойным [3]. Следствием послойного горения в замкнутых камерах является возникновение неоднородного состояния продуктов реакции. Элементарный слой газа, который сгорел в самом начале после поджога топливной смеси, получает температуру продуктов реакции, которая соответствует тому давлению, при котором происходило сгорание этого слоя. Дальнейшее повышение температуры этого элементарного объема происходит вследствие адиабатического сжатия близлежащими слоями, причем сжатие происходит непрерывно, начиная от повышения давления при сгорании соседних слоев до окончательного давления, которое достигается после сгорания всей топливной смеси. Следует отметить, что те слои, которые сгорели в последнюю очередь, после завершения реакции не испытывали дополнительного сжатия, поэтому их температура не изменялась, а определялась только исходным состоянием перед началом горения. Таким образом, после сгорания всей топливной смеси в замкнутой камере, по мере удаления от места поджога, продукты горения имеют разную температуру: более высокую – вблизи места зажигания смеси, т. е. те слои, которые сгорели первыми и затем адиабатически сжимались до окончательного состояния; и более низкую – наиболее удаленные слои, которые сгорели последними. Это явление носит название эффекта Махе [3].

Обобщая, можно сказать, что нагрев каждого слоя смеси происходит в два этапа при химическом преобразовании и адиабатическом поджатии. Несмотря на то, что по всему объему камеры состав продуктов горения и абсолютное давление одинаковы, конечная температура газа зависит от последовательности этапов нагрева. При адиабатическом сжатии от давления  $P_0$  до давления  $P$  рост температуры от  $T_0$  до  $T$  описывается уравнением Пуассона

$$\frac{T}{T_0} = \left( \frac{P}{P_0} \right)^{(\gamma-1)/\gamma}, \quad (13)$$

где  $\gamma = c_p/c_v$ .

### 3. Численное исследование горения в замкнутой камере

Объектом исследования являются процессы горения, формирования ударных волн и их затухания в цилиндрической камере сгорания высотой 0,44 м и диаметром 0,28 м с поджогом в верхней части камеры.

При решении задачи рассмотрено сгорание метан-воздушной и метан-кислородной смесей. В ходе численного моделирования изучено влияние значения начального давления смеси и ее состава на переход между различными режимами сгорания топливной смеси, в частности на переход во взрывное сгорание.

Принято, что в момент перед зажиганием в камере находится неподвижная однородная смесь с массовой концентрацией топлива в соответствии со стехиометрическим соотношением.

Для численного исследования поставленной задачи использована модель, основанная на применении системы уравнений Навье-Стокса [4]. При исследовании горения использована модель скорости горения на основе расчета прогресса реакций [5]. В этом случае применена подробная кинетическая модель горения метана, и химическая реакция горения описана как совокупность элементарных реакций.

Для адекватного моделирования перехода между различными режимами горения, сетку конечных элементов (рис. 2) измельчили в наиболее вероятных местах возникновения взрывного сгорания, а также в зоне поджога смеси.

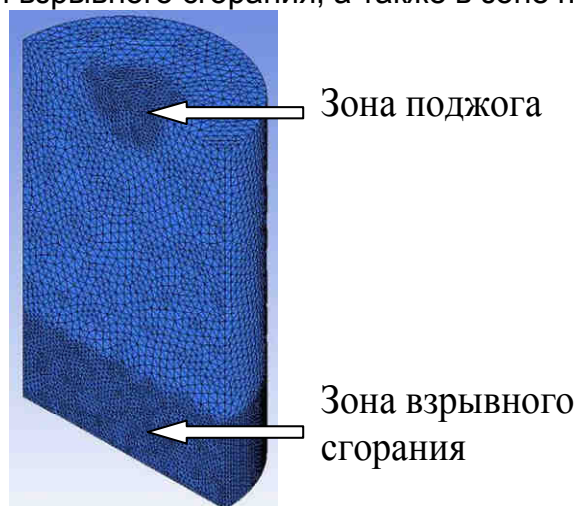


Рис. 2. Расчетная сетка конечных элементов

Моделирование выполнено для случаев горения метано-воздушных смесей с начальными давлениями в камере сгорания 0,3; 0,4; 0,5; 0,75; 1; 1,25 МПа.

При моделировании горения исследовали распространение фронта пламени и температурный режим в камере сгорания. Для получения информации об указанных объектах исследования проводили рендеринг по значению температуры по всему объему камеры сгорания, что позволило комплексно оценивать температурное состояние в камере в режиме реального времени (рис. 3).

Анализ результатов моделирования показывает, что уже с начальных моментов, пламя начинает интенсивно турбулизироваться, что сказывается на существенном завихрении поверхности фронта горения и увеличении площади его поверхности. Момент перехода к взрывному режиму сгорания, который сопровождался резким повышением давления и скорости горения, показан на рис. 4 для случаев с различным начальным давлением в камере.

В ходе моделирования определяли значения давления в камере сгорания при горении метанвоздушной смеси. Диаграммы, полученные при различных начальных давлениях, показаны на рис. 5

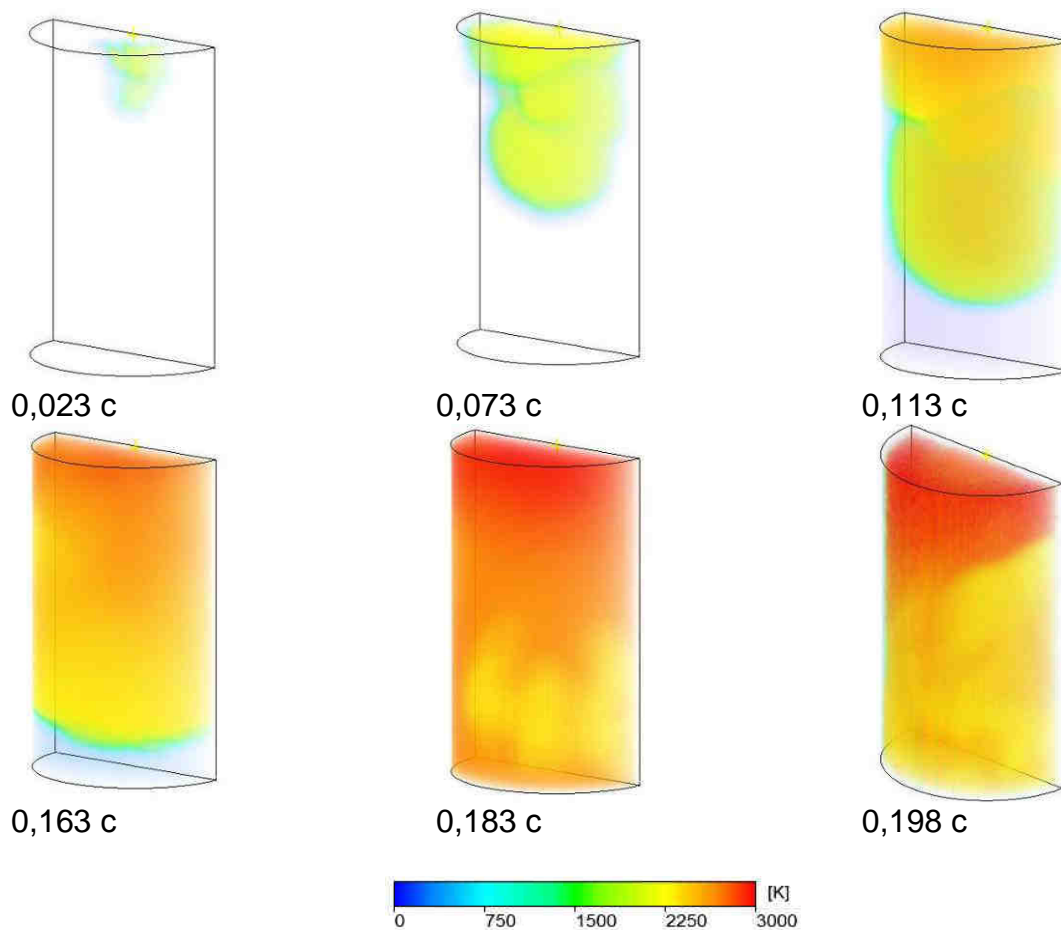


Рис. 3. Поле температур в камере при горении смеси метан-воздух ( $P_0 = 0,75$  МПа)

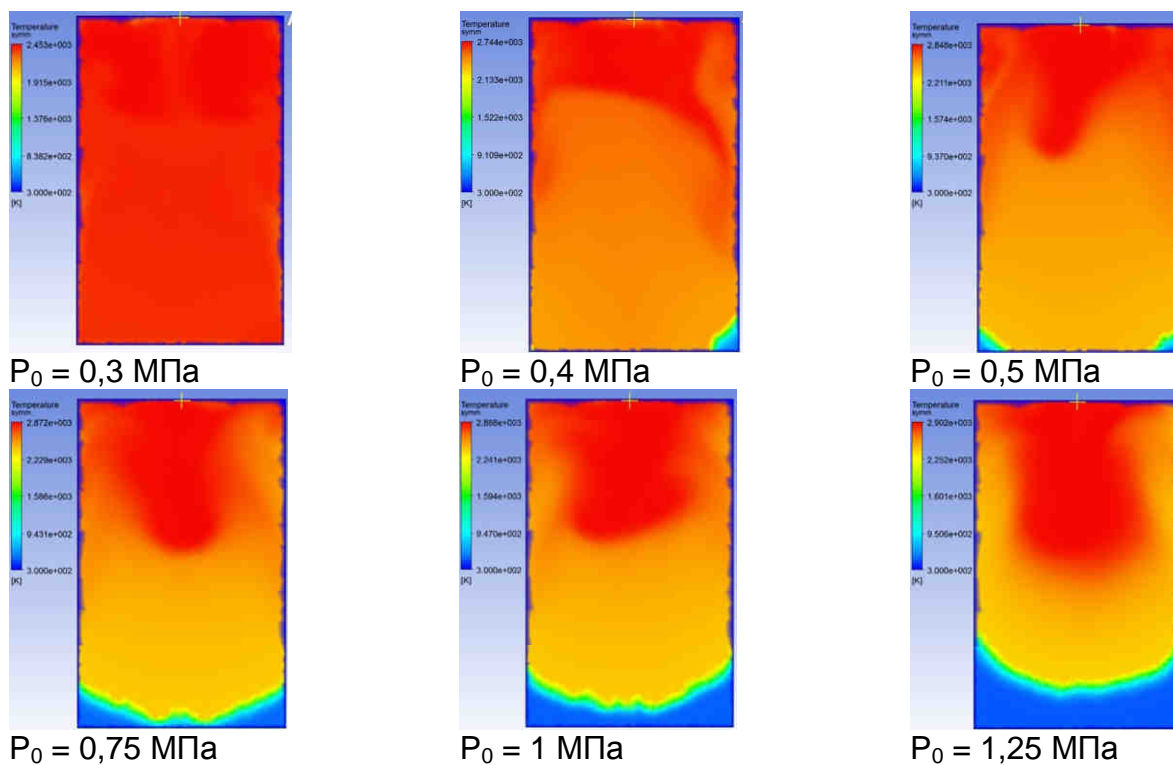


Рис. 4. Переход к взрывному режиму сгорания

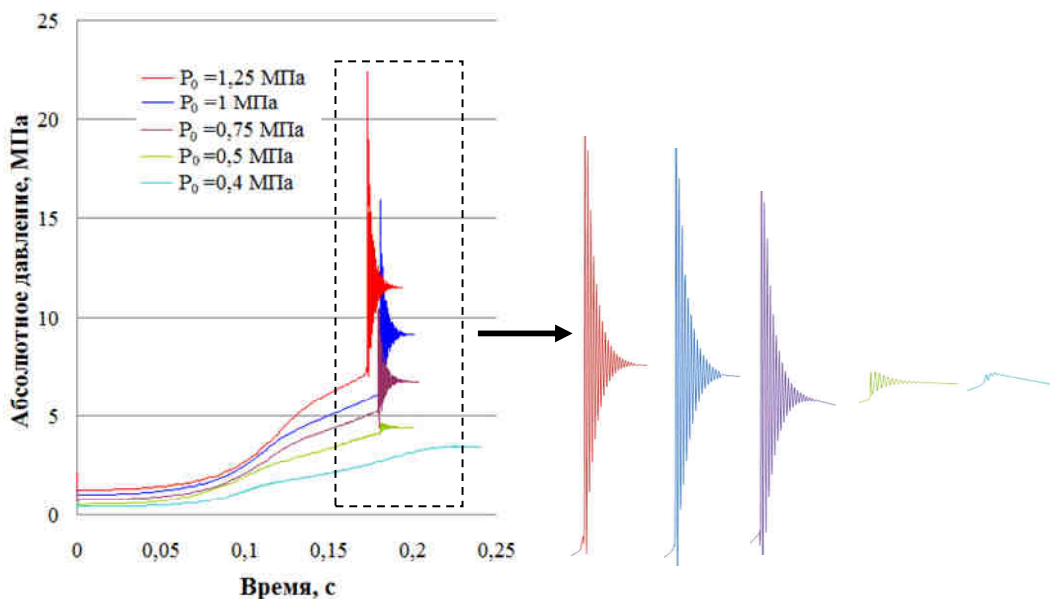


Рис. 5. Диаграммы давления при горении метанвоздушной смеси в камере сгорания

Горение в закрытых сосудах сопровождается повышением давления. В таких сосудах стенки препятствуют расширению газа и все тепло химической реакции идет только на увеличение внутренней энергии с возможным образованием ударных волн при переходе во взрывное сгорание.

При детонации части топливной смеси время затухания ударных волн связано с величиной заряда, т. е. количеством топливной смеси, которое сгорело в режиме взрыва, что определило интенсивность ударной волны. Под массой заряда понимают массу несгоревшей топливной смеси непосредственно перед переходом во взрыв. Более наглядной с точки зрения оценки величины заряда есть относительная масса топливной смеси, которую определяли по формуле (14), что показывает, какая часть от начального количества смеси сгорела во взрывном режиме:

$$\bar{m}_3 = \frac{m_3}{m_0}, \tag{14}$$

где  $\bar{m}_3$  – относительная масса заряда;  $m_3$  – масса заряда, кг;  $m_0$  – начальная масса топливной смеси, кг.

Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Относительная масса заряда

P <sub>0</sub> , МПа	m <sub>3</sub> , кг		m <sub>0</sub> , кг		m̄ <sub>3</sub>	
	CH <sub>4</sub> +воздух	CH <sub>4</sub> +O <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub> +воздух	CH <sub>4</sub> + O <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub> +воздух	CH <sub>4</sub> + O <sub>2</sub>
0,2	0	0	0	0	0	0
0,3	0	0,0000155	0	0,00141	0	0,011
0,4	0,001	0,00009	0,061	0,00188	0,016393	0,047872
0,5	0,00748	0,000207	0,0762	0,00235	0,098163	0,088
0,75	0,032	0,000534	0,114	0,00352	0,280702	0,151705
0,1	0,0586	0,00094	0,152	0,0047	0,385526	0,2
1,25	0,0866	0,00138	0,19	0,00588	0,455789	0,234694

Согласно результатам моделирования при начальном давлении менее 0,3 МПа перехода к взрывному сгоранию не происходит и вся смесь сгорает в обычном режиме. Это свидетельствует о том, что при таких условиях теплоотвод через стенки камеры препятствует накоплению достаточного количества избыточной теплоты, достаточной для перехода во взрывное сгорание топливной смеси.

График зависимости относительной массы детонирующего заряда от начального давления в камере сгорания изображен на рис. 5.

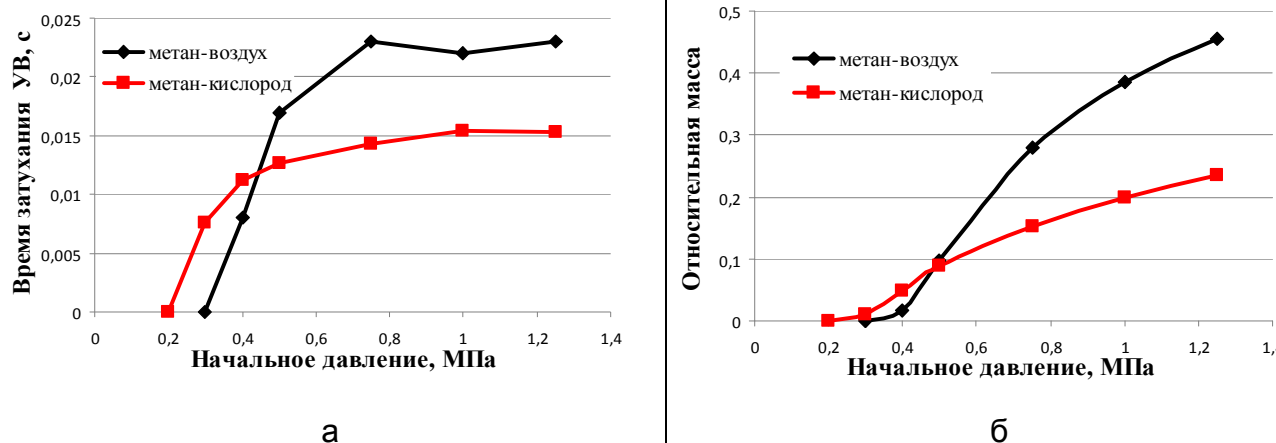


Рис. 5. Влияние начального давления смеси и ее состава на параметры: а – на время затухания ударных волн; б – на относительную массу заряда

Полученные кривые можно использовать как регулирующие зависимости, которые позволяют в автоматизированном режиме рассчитывать энергетические характеристики приводов импульсного оборудования.

## Выводы

1. Разработана математическая модель горения в замкнутой камере сгорания постоянного объема с учетом перехода во взрывное сгорание газовой смеси. Показано, что после сгорания всей топливной смеси в замкнутой камере, по мере удаления от места поджога, продукты горения имеют разную температуру: более высокую – вблизи места зажигания смеси, т. е. те слои, которые сгорели первыми и затем адиабатически сжимались до окончательного состояния, и более низкую – наиболее удаленные слои, которые сгорели последними.

2. Получены зависимости времени затухания ударных волн и массы заряда от начального давления в камере, которые могут быть использованы как регулирующие зависимости, которые позволяют в автоматизированном режиме рассчитывать энергетические характеристики приводов импульсного оборудования.

## Список литературы

1. Импульсная резка горячего металла [Текст] / В. С. Кривцов, А. Ю. Боташев, А. Н. Застела и др. // Авиационно-космическая техника и технология. – 2007. - №11(47). – С. 26 – 34.
2. Франк-Каменецкий, Д. А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике [Текст] / Д. А. Франк-Каменецкий. – М.: Наука, 1987. – 502 с.



3. Математическая теория горения и взрыва [Текст] / Я. Б. Зельдович, Г. И. Баренблатт, В. Б. Либрович, Г. М. Махвиладзе. – М.: Наука, 1980. – 478 с.

4. Математическое моделирование горения топливной смеси в камерах термоимпульсных машин с учетом перехода сгорания в детонационный режим [Текст] / С.И. Планковский, О. В. Трифонов, О. В. Шипуль, В. Г. Козлов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. – № 1 (88). – С. 5-9.

5. Трифонов, О. В. Влияние выбора моделей горения и механизмов реакций на достоверность прогнозирования перехода горения в детонацию [Текст] / О. В. Трифонов, Д. А. Брега, А. А. Болоховец, Е. С. Палазюк // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 63. – Х., 2014. – С. 160 – 169.

Поступила в редакцию 16.06.2016

## Моделювання горіння газових сумішей в замкнутій камері згоряння енергоприводів імпульсного обладнання

Проведено моделювання горіння в замкнутій циліндричній камері постійного об'єму з урахуванням переходу процесу згоряння паливної суміші з дефлаграційного в детонаційний режим з формуванням ударних хвиль (УХ). Досліджено особливості горіння в замкнутому просторі. Отримано залежності часу загасання УХ і маси газу, згорілого в режимі теплового вибуху, залежно від початкового тиску в камері.

**Ключові слова:** модель швидкості горіння, детальний механізм окислення, детонація, перехід горіння в детонацію, ударна хвиля, тепловий вибух математичне моделювання.

## Simulation of gas Mixture Combustion into a Constant Volume Combustion Chamber of the Pulse Equipment

The simulation of combustion in a closed constant volume cylindrical chamber taking into account the deflagration to detonation transition with the formation of the shock wave (SW). The features of combustion in a constant volume was investigated. Obtained dependence of the damping of the shock wave and the mass of the gas, burned down in thermal explosion mode, depending on the initial pressure in the chamber.

**Keywords:** burning velocity model, the detailed mechanism of the oxidation, detonation, deflagration to detonation transition, shock wave, thermal explosion.

### Сведения об авторах:

**Трифонов Олег Валериевич** – канд. техн. наук, старший преподаватель каф.104 «Технологии производства летательных аппаратов», Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Украина.

**Застела Александр Николаевич** – канд. техн. наук, профессор каф.104 «Технологии производства летательных аппаратов», Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Украина.