

Исследование процесса образования топливовоздушной смеси в импульсной камере сгорания и термодинамический расчет импульсного горения

Исаев А.И.*, Майрович Ю.И., Сафарбаков А.М.***, Ходацкий С.А.******

Иркутский филиал «Московский государственный технический университет гражданской авиации», ул. Советская, 139, Иркутск, 664047, Россия

**e-mail: isaew_alexandr@mail.ru*

***e-mail: mator38@mail.ru*

****e-mail: safarbakov@yandex.ru*

*****e-mail: sergeixodatski.kafedra@mail.ru*

Аннотация

Известно множество проектов пульсирующих воздушно реактивных двигателей (ПуВРД) реализующих при своей работе цикл Гемфри [1]. В основном все проекты направлены на обоснование конструкции импульсной камеры сгорания. При проектировании ПуВРД не уделено должного внимания процессу образования топливовоздушной смеси (ТВС), хотя этот процесс определяет полноту сгорания, а как следствие и количество вредных выбросов, к которым в последнее время предъявляются всё более жесткие требования [2]. В процессе организации топливовоздушной смеси необходимо создать объемную циркуляционную зону, чтобы распространить её на весь объем камеры сгорания. Существующие способы организации циркуляционных зон не обеспечивают их большой объем. При проектировании импульсной камеры сгорания необходимо управлять течением в её

проточной части таким образом, чтобы достичь как можно большего объема циркуляционных зон.

В работе решается научная задача по обеспечению процесса смесеобразования в импульсной камере сгорания.

Основной целью работы является организация процесса импульсного горения ТВС.

Научная новизна работы заключается:

- в обосновании конструкции импульсной камеры сгорания;
- в разработке технологического процесса организации топливно-воздушной смеси в проточной камере сгорания с импульсной подачей топлива и ее горения;
- в разработке методики расчета параметров газовой среды в процессе импульсного горения ТВС в импульсной камере сгорания.

Ключевые слова: завихритель, импульсная камера сгорания, фронтное устройство, топливовоздушная смесь, циркуляционные зоны.

Введение

Камера сгорания (КС) – устройство, в котором в результате сгорания топлива осуществляется повышение температуры поступающего в него воздуха (газа). [3].

Импульсная камера сгорания (ИКС) (рис. 1) представляет собой трубчатую КС [4], состоящую из:

- фронтального устройства, представляющего собой обратный клапан. Он включает в себя седло 1, тарелку обратного клапана 2 со штоком 3 и возвратной пружиной 4. За обратным клапаном расположен завихритель потока [5], обеспечивающий создание циркуляционных зон. Обратный клапан обеспечивает импульсную подачу воздуха в камеру сгорания;
- цилиндрической части камеры сгорания 5, обеспечивающей определенный объем для существования циркуляционных зон и, зон в которых происходит горение топливовоздушной смеси;
- суживающейся части 6, обеспечивающей дросселирование потока газов для повышения давления в КС;
- свечи розжига топливовоздушной смеси 7;
- импульсной форсунки 8 с электромагнитным отсекателем топлива 9, служащей для импульсной подачи топлива в камеру сгорания.

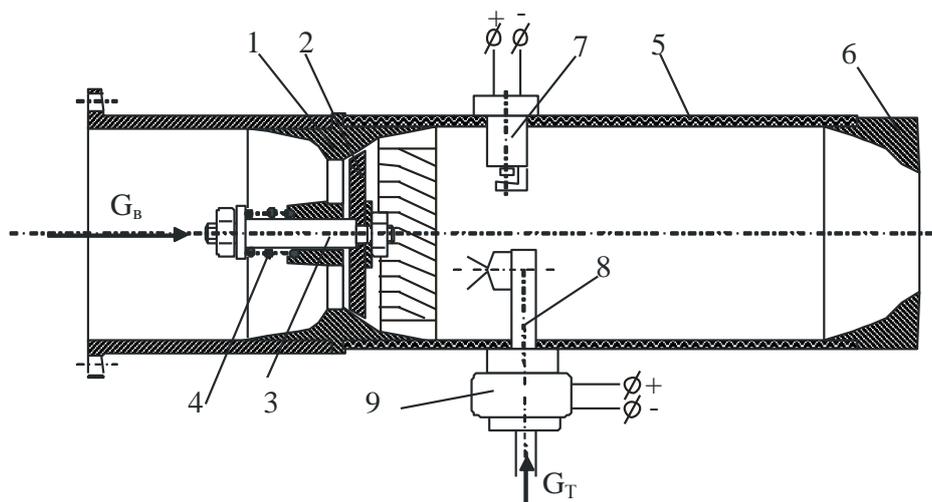


Рис. 1 Схема импульсной камеры сгорания

Исследование процесса образования топливовоздушной смеси в импульсной камере сгорания.

Технологический процесс образования топливовоздушной смеси в импульсной камере сгорания во многом зависит от соотношения количества воздуха и топлива и от расположения импульсной топливной форсунки. Реализация этого условия предполагает строгое дозирование компонентов, а также определенное положение топливной форсунки в камере сгорания. Получая топливовоздушную смесь с коэффициентом избытка воздуха равным единице, необходимо достичь того чтобы эта смесь была равномерно распределена по всему объёму камеры сгорания. Достичь этого можно определённым положением топливной форсунки в камере сгорания. Для реализации этого условия была проведена серия экспериментов по выявлению наилучшего положения топливной форсунки в камере сгорания.

Эксперименты для выявления равномерности перемешивания топливовоздушной смеси проводились в гидробассейне, и в натурной камере сгорания при ее испытаниях на установке камерный стенд [6]. Для впрыска топлива используется импульсная топливная форсуна центробежного типа.

В импульсной камере сгорания течение сильно турбулизировано, что в сочетании с высокой температурой приводит к моментальному испарению капель керосина. Такое протекание процесса смесеобразования позволяет создать однородную топливовоздушную среду в объеме камеры сгорания, что позволяет проводить исследования на воде с использованием подкрашивающей жидкости.

Согласно теории подобия, переход от реальной ИКС к её модели, требует

обеспечения газо- и гидродинамического подобия течений, согласно которому необходимо удовлетворить следующим условиям:

1. Геометрическому подобию;
2. Кинематическому подобию;
3. Динамическому подобию.

В перечисленных условиях определяющим является критерий Рейнольдса Re . Для известных натуральных объектов (реальных камер сгорания) действительные числа $Re_{кр}$, определяемые для воды по гидравлическому диаметру входа в камеру сгорания $D_э$, составляют $Re_{кр} \approx 10^5$. Тогда при изготовлении модели КС для обеспечения подобия по числу Re достаточно выполнить условие $Re > Re_{кр}$. Число Re , определенное для модели $Re_{мод} = 2780678$, т.е. $Re_{мод} \gg Re_{кр}$. Таким образом, течение в канале реальной камеры сгорания в канале модели можно считать подобными по числу Рейнольдса, т.е., эксперимент проводится в автомодельной области по Re .

При моделировании процессов смесеобразования в камере сгорания в гидробассейн помещается её натурная модель, и внутри камеры при помощи водоподводящего патрубка задается расход воды. Возникающие течения внутри модели подвергаются исследованиям.

Визуализация течений в модели камеры сгорания осуществляется при помощи подкрашенной жидкости, вводимой в области течений центробежной форсункой.

Эксперимент №1. При расположении топливной форсунки на удалении более двух диаметров тарелки обратного клапана от фронтального устройства и впрыске

топлива в сторону сопла (рис.2, 3), объем, в котором произойдет смесеобразование, будет составлять около 15% от объема всей камеры сгорания.

Эксперимент №2. При расположении топливной форсунки на удалении менее одного диаметра тарелки обратного клапана от фронтального устройства и впрыске топлива в сторону сопла, объем, в котором произойдет смесеобразование, будет составлять около 30% от объема камеры сгорания (рис. 4, 5).

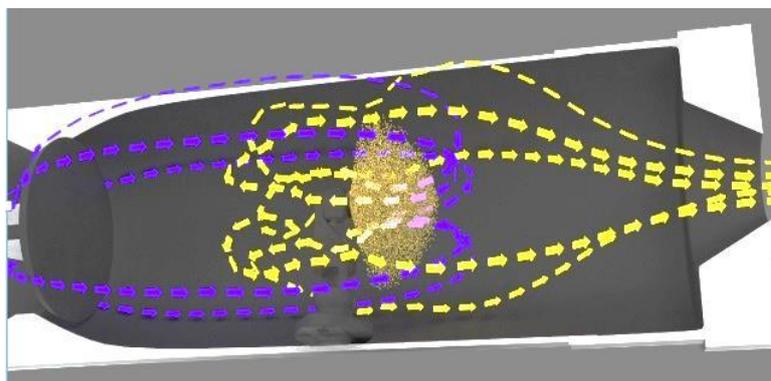


Рис 2. Моделирование образования топливовоздушной смеси при расположении форсунки на удалении более двух диаметров обратного клапана



Рис. 3 Исследование образования топливовоздушной смеси на модели импульсной камеры сгорания при расположении форсунки на удалении более двух диаметров обратного клапана

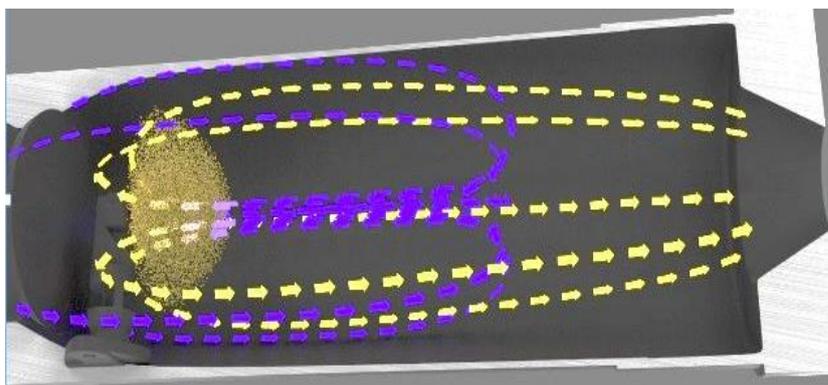


Рис. 4 Моделирование образования топливовоздушной смеси при расположении форсунки на удалении менее одного диаметра обратного клапана

При осуществлении такого процесса горения, часть несгоревшего топлива, под воздействием фронта пламени будет выбрасываться из сопла, и догорать вне камеры сгорания.



Рис. 5 Исследование образования топливовоздушной смеси на модели импульсной камеры сгорания при расположении форсунки на удалении менее одного диаметра обратного клапана

Эксперимент №3. При расположении топливной форсунки на удалении менее одного диаметра тарелки обратного клапана от фронтального устройства, и впрыске топлива в сторону тарелки обратного клапана, в процессе смесеобразования будет

задействована зона циркуляционного течения, при этом воздух, проходящий по периферии камеры сгорания в смесеобразовании участвовать не будет (рисунок 6, 7). Объем, в котором произойдет смесеобразование, будет составлять порядка 60% от объема всей камеры сгорания.

При осуществлении такого процесса горения, опять же часть несгоревшего топлива, под воздействием фронта пламени будет выбрасываться из сопла, и догорать вне камеры сгорания.

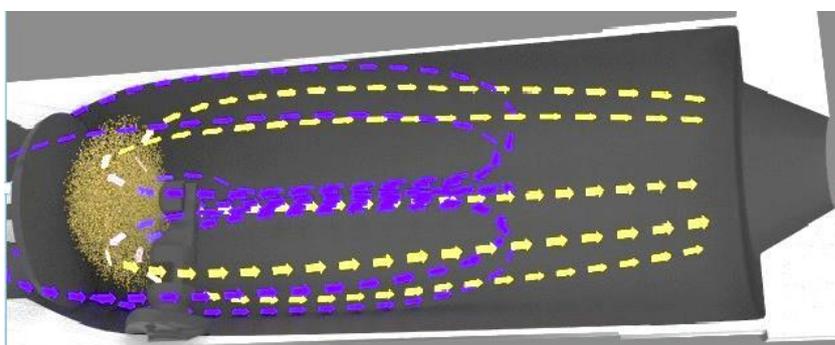


Рис. 6 Моделирование образования топливовоздушной смеси при расположении форсунки на удалении менее одного диаметра обратного клапана

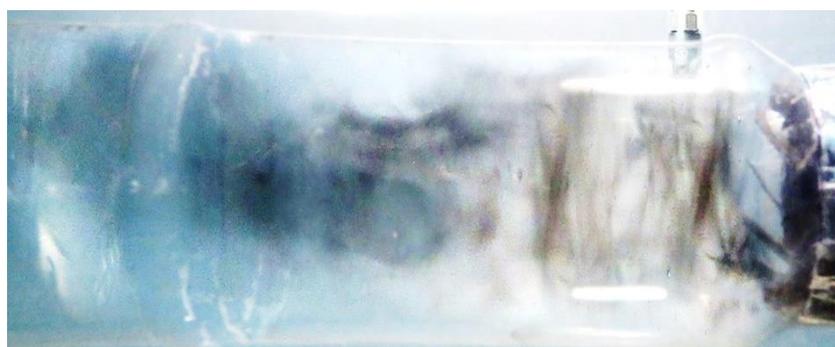


Рис. 7 Исследование образования топливовоздушной смеси на модели импульсной камеры сгорания при расположении форсунки на удалении менее одного диаметра обратного клапана

Эксперимент №4. При расположении топливной форсунки перед обратным клапаном в объем камеры сгорания поступит готовая топливовоздушная смесь, которая будет гомогенна по всему объему камеры сгорания (рисунок 8, 9). Такая топливовоздушная смесь заполнит весь объем камеры сгорания и сгорит в ее пределах.

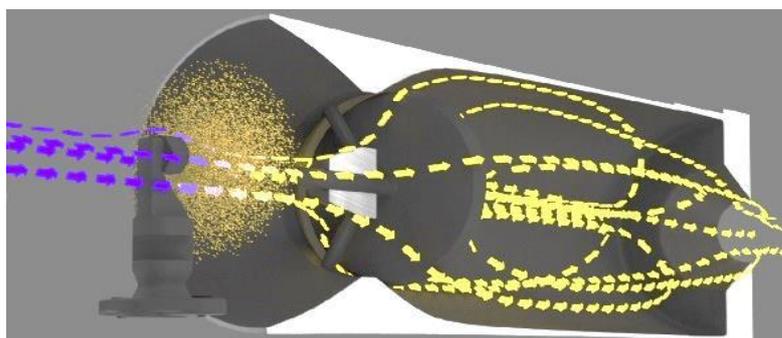


Рис. 8 Моделирование образования топливовоздушной смеси при расположении форсунки за обратным клапаном



Рис. 9 Исследование образования топливовоздушной смеси на модели импульсной камеры сгорания при расположении форсунки за обратным клапаном

Результаты натурального эксперимента, проведенные при «горячих» испытаниях импульсной камеры сгорания представлены в виде значений величины звукового

давления, создаваемого при взрывном горении топливовоздушной смеси. Известно, что чем полнее во время импульса сгорит топливовоздушная смесь, тем больший уровень звука будет выделяться. Оценка звукового давления позволяет косвенно оценить эффективность про Таким образом, оценка звукового давления позволяет косвенно оценить, какое расположение топливной форсунки является более выгодным. При этом свеча зажигания всегда устанавливается в зону обратных токов.

Для определения акустического давления и длительности процесса горения был применен прибор шумомер «Октава-110А».

В эксперименте №1 максимальная величина звукового давления достигала 100 дБ, при фоновом уровне 87 дБ. При этом свеча зажигания находилась следом за топливной форсункой. Если свечу зажигания перенести ближе к обратному клапану, то в некоторых случаях воспламенения не происходит. Длительность горения составляет 0.05 секунды.

В эксперименте №2 максимальная величина звукового давления составила 115 дБ. При этом свеча зажигания находится в циркуляционной зоне следом за топливной форсункой. Розжиг топливовоздушной смеси устойчивый. Длительность горения составляет 0.07 секунды.

В эксперименте №3 максимальная величина звукового давления составила 128 дБ. Свеча зажигания находится следом за топливной форсункой в циркуляционной зоне. Розжиг топливовоздушной смеси устойчивый. Длительность горения составляет 0.08 секунды.

В эксперименте №4 максимальная величина звукового давления составила 137 дБ. Свеча зажигания находится на расстоянии одного эквивалентного диаметра в зоне обратных токов. Розжиг топливовоздушной смеси устойчивый. Длительность горения составляет 0.1 секунды.

Термодинамический расчет импульсного горения.

Методика термо-газодинамического расчета формируется на основе закономерностей и процессов взаимного превращения теплоты и механической работы [7, 8].

Для расчета необходимо принять допущения и выбрать исходные данные.

Допущения:

- образовавшаяся топливно-воздушная смесь гомогенна по объему циркуляционных зон;
- коэффициент избытка воздуха $\alpha=1$;
- удельная изобарная теплоемкость принималась постоянной;
- объем, в котором ведется расчет горения, представляет собой шар и усеченный шар.

Исходные данные:

- радиус камеры сгорания $r_{кс}=0,039$ м;
- радиус шара горения (начальный) $r_{ш}=0,0039$ м;
- универсальная газовая постоянная $R=287$;
- начальное давление $P=101325$ Па;
- начальная температура $T=313^0$ К;

- потребное количество воздуха для сжигания 1 кг керосина $L_0=14,8$;
- коэффициент избытка воздуха $\alpha=1$;
- атмосферное давление $P_{\text{атм}}=95849$ Па;
- показатель адиабаты $k=1,4$;
- молярный вес керосина $\mu=0,85$;
- радиус сопла дросселирующего устройства $r_c=0,011$ м;
- скорость горения $v=100$ м/с.

Расчет импульсного горения начинается с определения теплотворной способности керосина [9]. Теплотворная способность керосина берется со справочных данных $Hu = 43050 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$.

Определяется температура горения керосина ($Hu = Q_H^p$):

$$T_G = \frac{Hu}{(1 + \alpha \cdot L_0) \cdot c_V} + T_{\text{НАЧ}} = 4100^{\circ} \text{K} \quad (1)$$

Процесс импульсного сгорания топливовоздушной смеси, является быстротечным и протекает за 0,1 секунды. Фронт пламени, образовавшийся в момент поджога топливовоздушной смеси свечей зажигания, представляет собой шар, который распространяется в объеме камеры сгорания, при достижении стенок камеры сгорания, заполнение объема, происходит в виде усеченного шара (цилиндра). Для расчета процесса горения топливовоздушной смеси в импульсной камере сгорания в первую очередь необходимо определить объем шара горения $V_{ш}$.

$$V_{ш} = \frac{4}{3} \pi R^3, \quad (2)$$

где R – радиус шара горения.

Из уравнения состояния газа определяется масса воздуха в шаре m_g :

$$P_{нач} V_{ш} = m_g RT_{нач} , \quad (3)$$

где R – универсальная газовая постоянная, $T_{нач}$ – температура воздуха в начальный момент, $P_{нач}$ – давление воздуха в начальный момент.

$$m_g = \rho V_{ш} = \frac{P_{нач} V_{ш}}{RT_{нач}} , \quad (4)$$

где ρ - плотность воздуха $\rho = \frac{P}{RT_{нач}} = \frac{101325}{313 \cdot 287} = 1,12795 \text{ кг/м}^3$.

Зная массу воздуха, участвующего в горении, определяется масса топлива m_T :

$$m_T = \frac{m_g \cdot \alpha}{L_0} , \quad (5)$$

где α – коэффициент избытка воздуха, L_0 - потребное количество воздуха для сжигания 1 кг керосина.

Из формулы для определения теплотворной способности топлива:

$$Hu = \frac{c_v (T_T + T_{нач})}{(1 + \alpha \cdot L_0)} , \quad (6)$$

где c_v – удельная изохорная теплоемкость газа, T_T – температура горения топлива.

Определяем температуру горения топливоздушнoй смеси:

$$T_T = \frac{Hu}{(1 + \alpha \cdot L_0) \cdot c_v} + T_{нач} , \quad (7)$$

Давление горения, при известной температуре горения, рассчитывается по формуле:

$$p_{\Gamma} = \frac{T_{\Gamma} p_{НАЧ}}{T_{НАЧ}}. \quad (8)$$

Из уравнения сохранения энергии:

$$i_1 + \frac{c_1^2}{2} = i_2 + \frac{c_2^2}{2}, \quad (9)$$

где i_1 – энтальпия газа до сопла, i_2 – энтальпия газа в сечении сопла, c_1 – скорость газа на входе в сопло, c_2 – скорость газа на срезе сопла.

Выразим скорость истечения газов из сопла камеры сгорания:

$$i_1^* = i_2 + \frac{c_2^2}{2}, \quad (10)$$

$$c_2 = \sqrt{2 \cdot (i_1^* - i_2)} = \sqrt{2 \cdot C_p (T_1^* - T_2)} = \sqrt{2 \cdot C_p T_1^* \left(1 - \frac{T_2}{T_1^*}\right)}, \quad (11)$$

где c_p – удельная изобарная теплоемкость, T_1^* – полная температура перед началом горения, T_{Γ} – температура горения ТВС.

При течении газа в элементах авиационных установок изменение потенциальной энергии сил тяжести gH пренебрежительно мала ($gH_1 \approx gH_2$), поэтому данный вид энергии не учитывается в уравнении сохранения энергии.

Теплоемкость, будучи теплофизическим свойством тела, зависит от процесса подвода (или отвода) энергии. В изохорном процессе вся подводимая энергия затрачивается на повышение скорости хаотического движения частиц газа, проявляющееся в изменении температуры тела. В изобарном процессе часть

тепловой энергии идет на повышение температуры газа, а часть затрачивается на совершение работы по изменению объема газа. Удельная массовая теплоемкость в изобарном процессе c_p , в изохорном процессе c_v связаны между собой зависимостью:

$$c_p = \frac{k}{k-1} R, \quad (12)$$

Отсюда можно получить конечную формулу скорости газов на выходе из сопла камеры сгорания:

$$c_2 = \sqrt{\frac{2k}{k-1} RT_x^* \left(1 - \frac{1}{\pi_c^{\frac{k}{k-1}}}\right)}, \quad (13)$$

где π_c - степень понижения давления газа в сопле $\pi_c = \frac{p_1^*}{p_n} = \frac{101325}{95849} = 1,0571$, T_x^*

- температура холодного газа в камере сгорания.

Так как процесс горения ТВС идет импульсами, то в камере сгорания будет присутствовать горячий и холодный газ. До достижения горячим газом сопла камеры сгорания холодный газ будет выталкиваться фронтом пламени в сопло.

В импульсной камере сгорания используется суживающееся сопло, а значит имеет место критический режим течения газа, при увеличении π_{cp} до $\pi_{cp} = \pi_{кр}$ и $c_2 = c_{кр} = a_{кр}$. При увеличении π_{cp} до значения большего $\pi_{кр}$ ($\pi_{cp} > \pi_{кр}$) наступает сверхкритический режим течения газа. Сверхкритические режимы течения газа в таком сопле являются нерасчетными (режимы недорасширения), так как давление газа на срезе сопла больше давления окружающей среды p_n , газ, выйдя из сопла, продолжает расширяться до давления окружающей среды.

Для дальнейшего расчета, необходимо определить объём камеры сгорания:

$$V_{kc} = \pi \cdot r^2 \cdot L_{KC}, \quad (14)$$

где r – радиус камеры сгорания, L_{KC} – длина камеры сгорания.

Общее давление газовой смеси является суммой парциальных давлений холодной $P_{пр.х}$ и горячей $P_{пр.г}$ составляющей газов:

$$P_{сист} = P_{пр.г} + P_{пр.х}, \quad (15)$$

Парциальное давление горячих газов:

$$P_{пр.г} = P_{Г} \left(\frac{V_{ш}}{V_{kc} m_{в}} \right)^k, \quad (16)$$

Парциальное давление холодных газов будет равно начальному давлению системы при каждой новой итерации расчетов. Под начальным, понимается давление холодных газов, полученное в предыдущей итерации:

$$P_{пр.х} = P_{н}^*, \quad (17)$$

Температура является термодинамическим параметром газа, под которым понимают меру средней кинетической энергии поступательного движения молекул газа. Следовательно, необходимо знать температуры холодных компонентов системы $T_{сист.х}$ и горячих $T_{сист.г}$:

$$T_{сист.х} = T_{х} \cdot \left(\frac{P_{сист}}{P_{пр.х}} \right)^{\frac{k-1}{k}}, \quad (18)$$

$$T_{сист.г} = T_{Г} \cdot \left(\frac{P_{сист}}{P_{пр.г}} \right)^{\frac{k-1}{k}}, \quad (19)$$

Сумма холодных и горячих компонентов позволяет определить температуру газа в системе:

$$T_{см} = T_{сист.г} + T_{сист.х}, \quad (20)$$

Следующим шагом расчета является определение местной скорости звука:

$$a = \sqrt{k \cdot R \cdot T_{см}}, \quad (21)$$

Зная значение местной скорости звука, рассчитывается число Маха:

$$M = \frac{c}{a}, \quad (22)$$

Полное давление на срезе сопла:

$$p_2^* = p_{сист} \cdot \left(1 + \left(\frac{k-1}{2}\right) \cdot M^2\right)^{\frac{k}{k-1}}, \quad (23)$$

Давление на срезе сопла:

$$p_2 = p_{сист} \cdot \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}, \quad (24)$$

При известных значениях полного давления и давления газовой смеси определяется относительное давление в КС:

$$\Pi(\lambda_B) = \frac{p_{сист}}{p_2^*}, \quad (25)$$

Используя значение относительного давления, рассчитывается коэффициент скорости:

$$\Pi(\lambda_B)^{\frac{k-1}{k}} = 1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2, \quad (26)$$

Отсюда выразим значение коэффициента скорости:

$$\lambda = \sqrt{\frac{k+1}{k-1} \left[1 - \Pi(\lambda)^{\frac{k-1}{k}} \right]}, \quad (27)$$

Зная значение коэффициента скорости, рассчитывается относительная плотность потока:

$$q(\lambda) = \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{1}{k-1}} \lambda \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2 \right)^{\frac{1}{k-1}}, \quad (28)$$

Геометрическая площадь сопла рассчитывается по формуле:

$$F_c = \pi R^2 = 3,1416 \cdot 0,011^2 = 0,00038 \text{ м}^2, \quad (29)$$

Для вычисления расхода газа через сопло необходимо знать коэффициент рода газа:

$$m_\Gamma = \sqrt{\frac{k}{R} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}}, \quad (30)$$

Подставляя полученные значения в формулу для расхода газа, получим его величину:

$$G = m_\Gamma \frac{P_{cuct}^*}{\sqrt{T_x^*}} F_c q(\lambda), \quad (31)$$

Поскольку сопло всегда остается открытым необходимо учесть значение массы газа, вышедшего через сопло:

$$m_x = G \cdot \tau, \quad (32)$$

Заключительным этапом является расчет импульса силы, значение которого определяется по формуле:

$$I = G \cdot c_2 \cdot \tau . \quad (33)$$

Данный расчет проводится в некоторое количество итераций, которое определяется следующими факторами:

- углом установки лопаток завихрителя, что определяет объем циркуляционных зон (все другие геометрические характеристики завихрителя выбраны наилучшими);

- геометрическими размерами импульсной камеры сгорания, что в свою очередь определяет объем, в котором происходит процесс горения;

- диаметром сопла, который определяет время наполнения камеры сгорания свежей порцией топливовоздушной смеси, время нахождения продуктов сгорания в ней, а также время ее опорожнения;

- место поджога топливовоздушной смеси, определяет время и скорость распространения фронта пламени, в объеме камеры сгорания (место поджога выбирается в центре циркуляционной зоны за завихрителем);

- шагом расчета, от которого зависит точность полученных значений процесса горения топливовоздушной смеси в импульсной камере сгорания на каждой последующей итерации и конечного результата.

Для выполнения расчета, процесса импульсного горения, на каждой итерации необходимо определять порядка 60 значений различных параметров. Получение расчетов заданной точности требует большого количества итераций, выполнение таких расчетов на бумаге потребует достаточного количества времени, поэтому в

редакторе Microsoft Office Excel была составлена программа для автоматизации расчета.

Расчет процесса импульсного горения содержит 100 итераций.

Результаты расчета импульсного горения топливовоздушной смеси в камере сгорания выражены через графики.

На рисунке 10 показан график изменения парциального давления в камере сгорания в зависимости от времени горения ТВС при различных углах установки лопаток завихрителя. Анализ графика показывает, что максимальные величины парциального давления достигают при углах установки лопаток завихрителя $\theta=50^\circ$. Дальнейшее увеличение углов установки лопаток завихрителя не ведет к увеличению парциального давления.

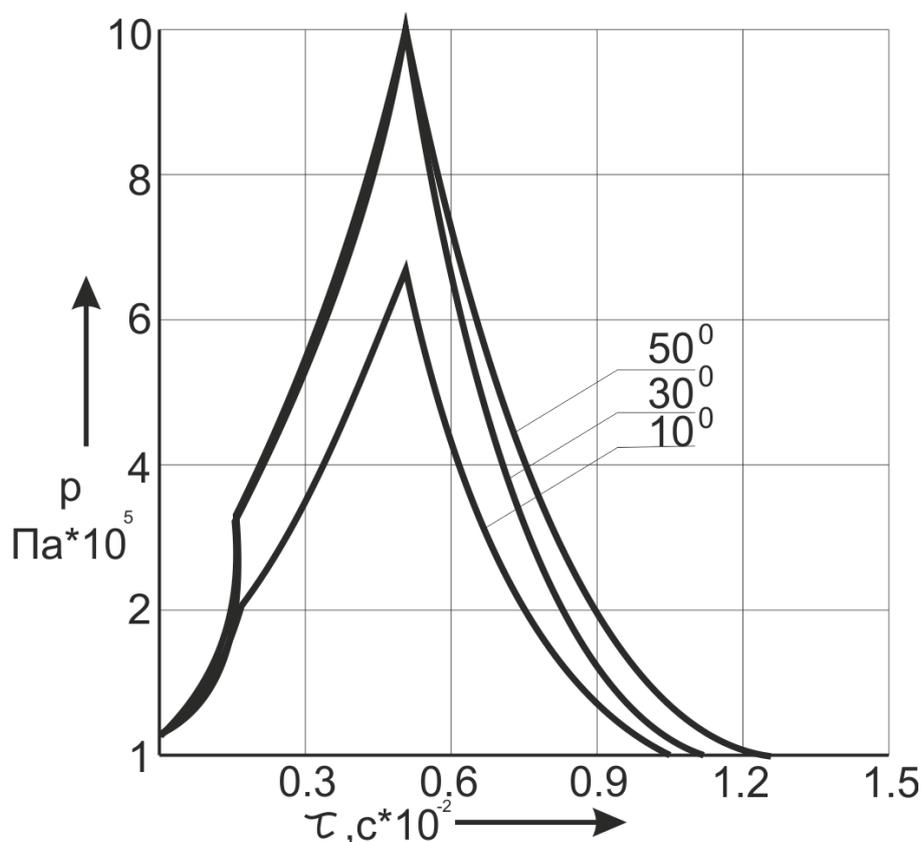


Рис. 10 Изменение парциального давления по времени горения ТВС

Объяснить это можно тем, что такой завихритель генерирует наибольшую циркуляционную зону по длине камеры сгорания. Следовательно, больший объем камеры сгорания будет занят качественно перемешанной ТВС. Такая смесь сгорит с наибольшим выделением тепла и давления.

На рисунке 11 показана зависимость расхода газа через сопло от времени горения при изменении угла установок лопаток завихрителя. Анализ графика показывает, что наибольшая величина расхода газа происходит при $\theta=50^\circ$. Объясняется это качественным перемешиванием ТВС.

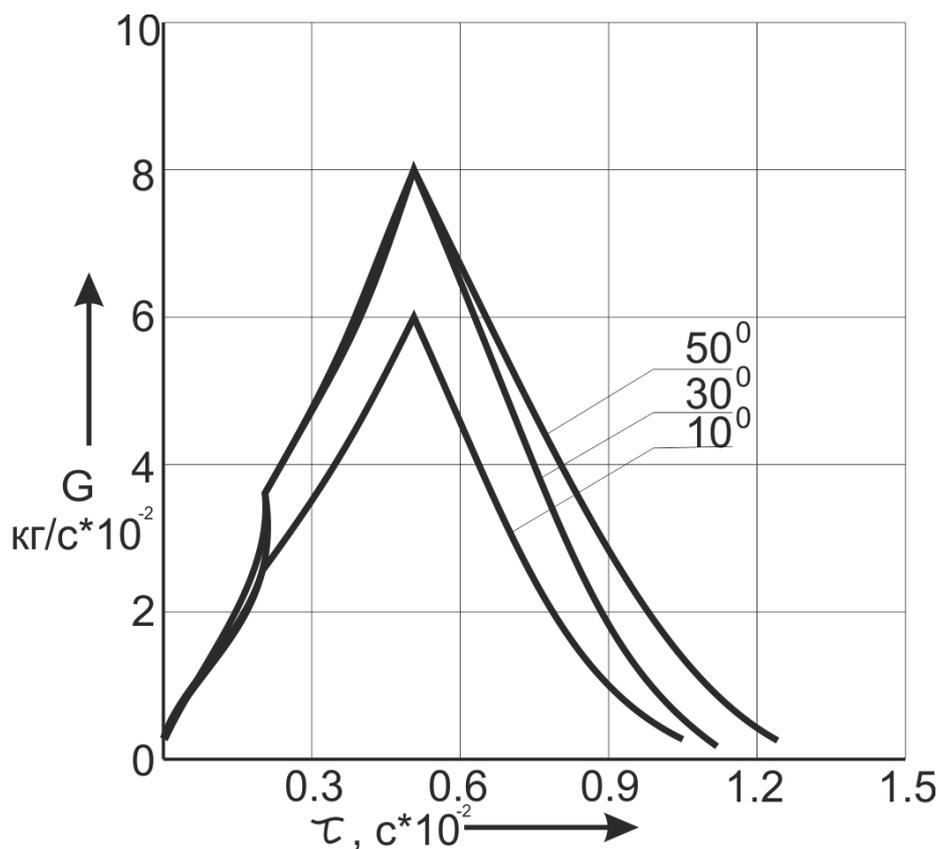


Рис. 11 Изменение расхода газа через сопло по времени горения ТВС

На рисунке 12 изображена зависимость импульса силы от выделившихся газов в процессе горения ТВС в камере сгорания по параметру времени.

Анализ графика показывает, что наибольшая величина импульса силы происходит при $\theta=50^{\circ}$. Дальнейшее увеличение углов установки лопаток завихрителя для камеры сгорания с выбранными геометрическими размерами не ведет к увеличению импульса силы.

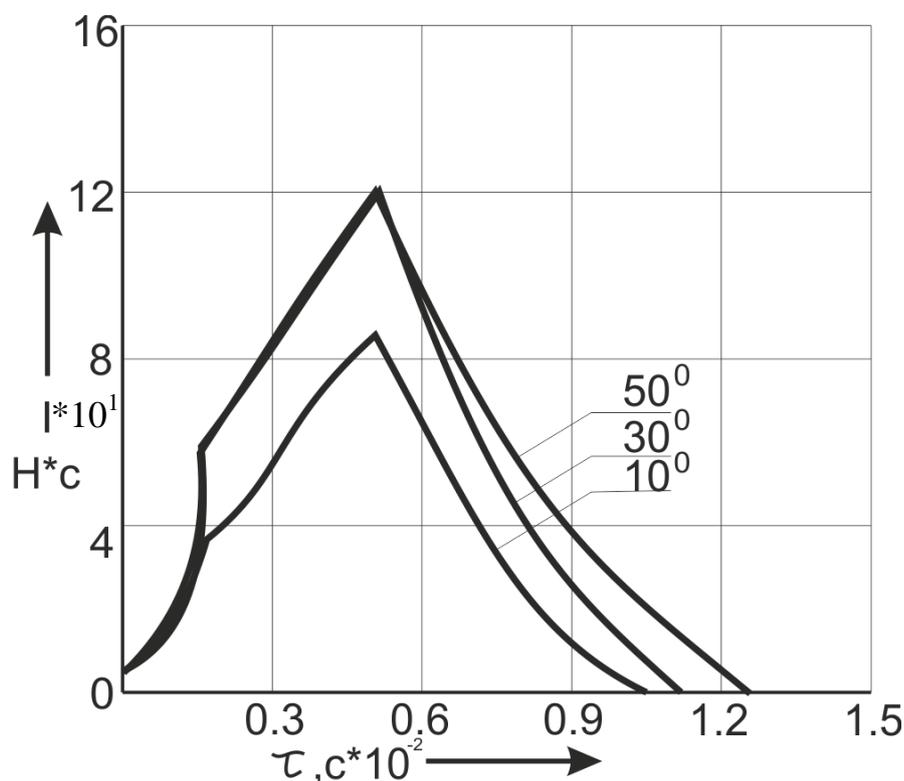


Рис. 12 Изменение импульса силы по времени горения ТВС

Дальнейшие исследования были направлены на выявление влияния диаметра дросселирующего устройства импульсной камеры сгорания (ИКС) (сопла) на исследуемые параметры.

На рисунке 13 представлен график изменения парциального давления при изменении диаметра сопла.

Анализ графика показывает, что увеличение диаметра сопла ведет к уменьшению давления в импульсной камере сгорания. Из этого можно сделать вывод, что для увеличения парциального давления диаметр сопла необходимо уменьшать.

В свою очередь уменьшение диаметра сопла ведет к уменьшению расхода газа через него (рис. 14).

Уменьшение расхода газа ведет к уменьшению величины импульса силы (рис. 15).

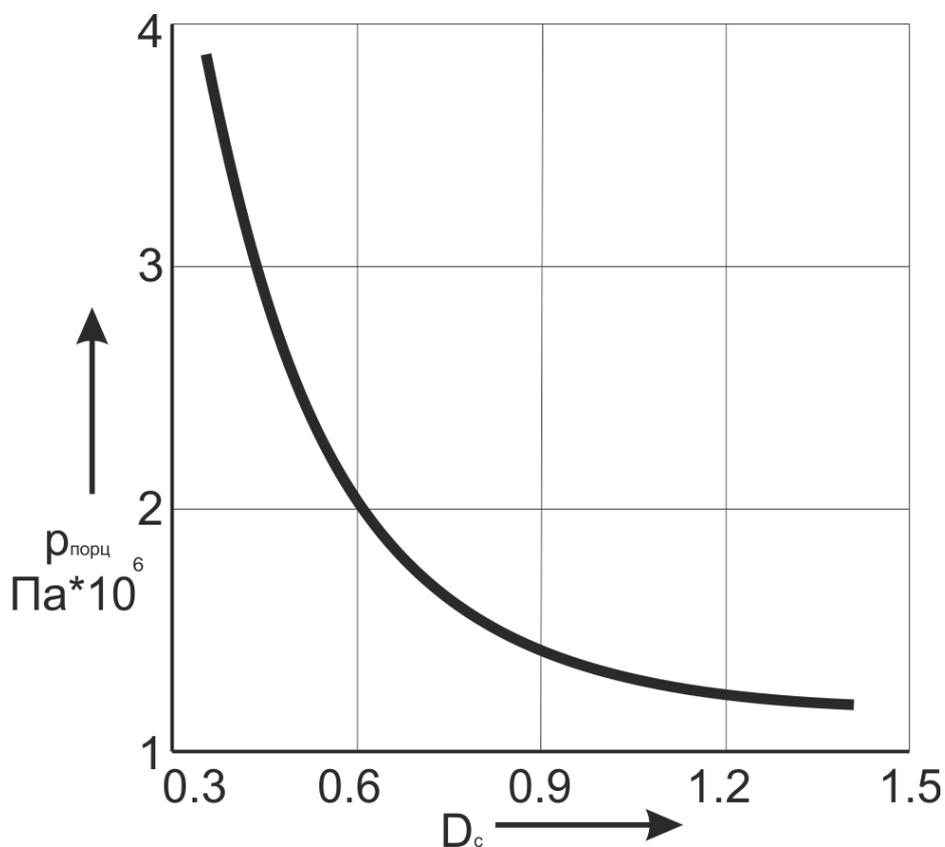


Рис.13 Изменение давления в ИКС при изменении диаметра сопла

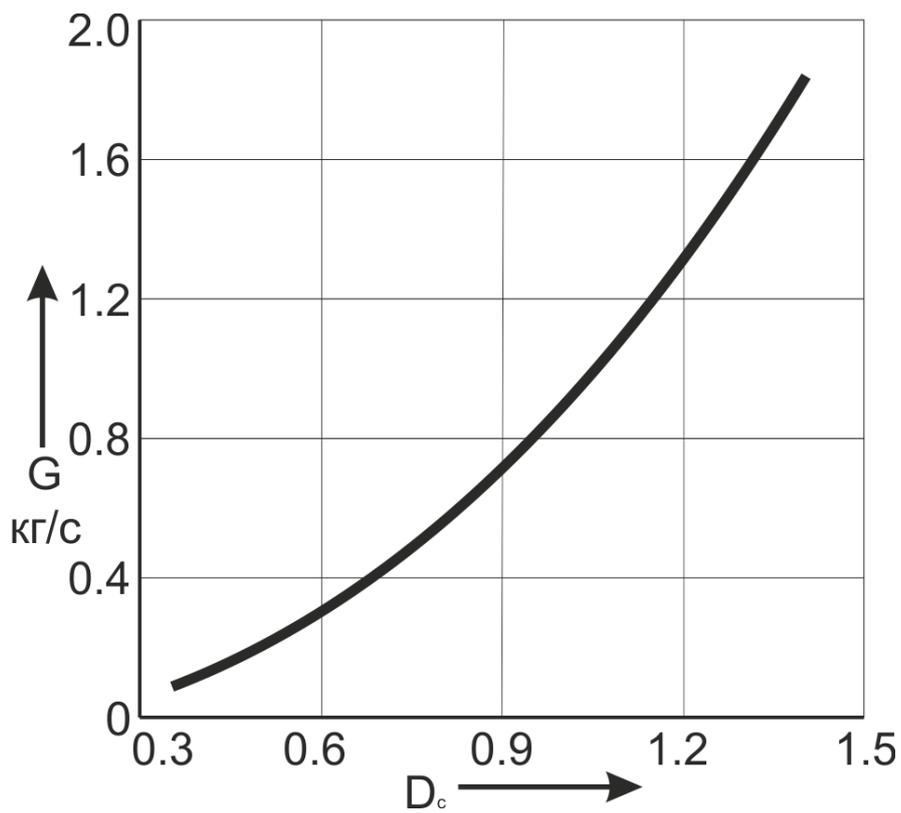


Рис.14 Изменение расхода газа при изменении диаметра сопла

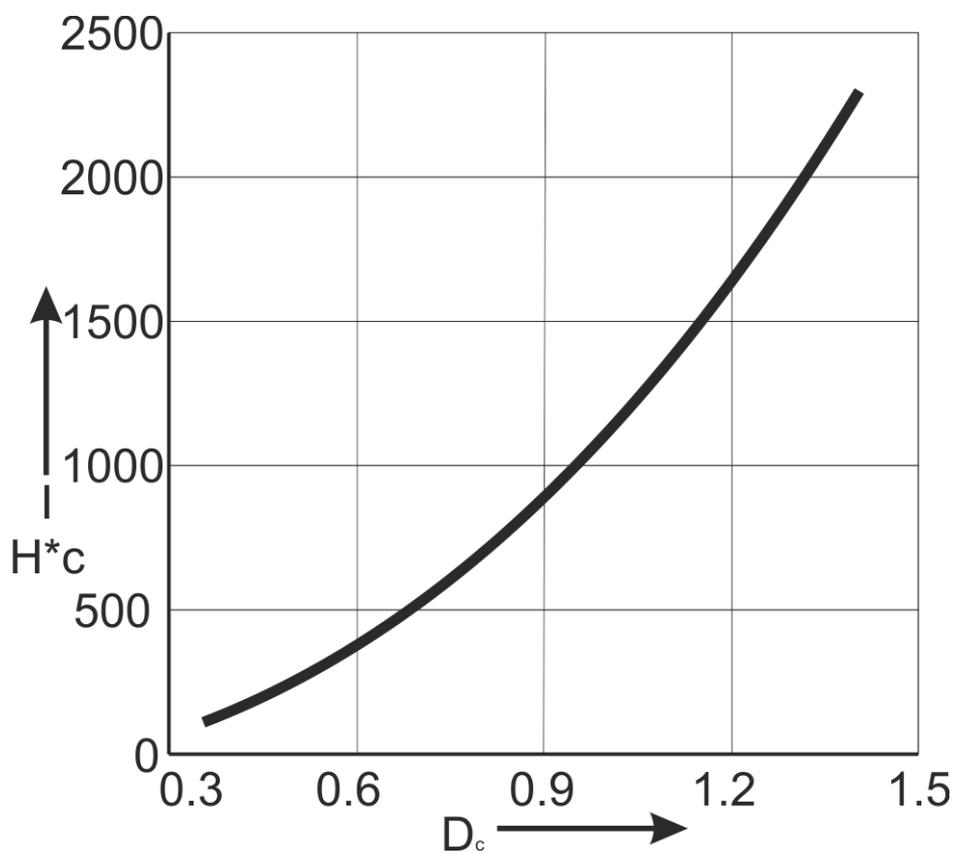


Рис.15 Изменение импульса силы при изменении диаметра сопла

Процесс импульсного горения ТВС является скоротечным и составляет около 0.1 с. Вследствие быстротечности процесса горения замерить параметры температуры невозможно, так как применяемые термопары очень инерционны. Поэтому сравнение результатов термо-газодинамического расчета и результатов натурных исследований можно провести по параметру давления. Для этого в магистрали камерного стенда и в импульсную камеру сгорания были установлены пьезоэлектрические датчики давления.

В процессе исследований производится замер абсолютного давления, создаваемого воздуходувкой, избыточного давления на входе в импульсную камеру сгорания пред обратным клапаном и избыточного давления газа непосредственно в камере сгорания (рисунок 16).

В результате снятия параметров давления получены следующие значения:

- абсолютное давление, создаваемое воздуходувкой - 147 кПа;
- избыточное давление перед камерой сгорания - 25 кПа;
- избыточное давление в камере сгорания - 109 кПа.

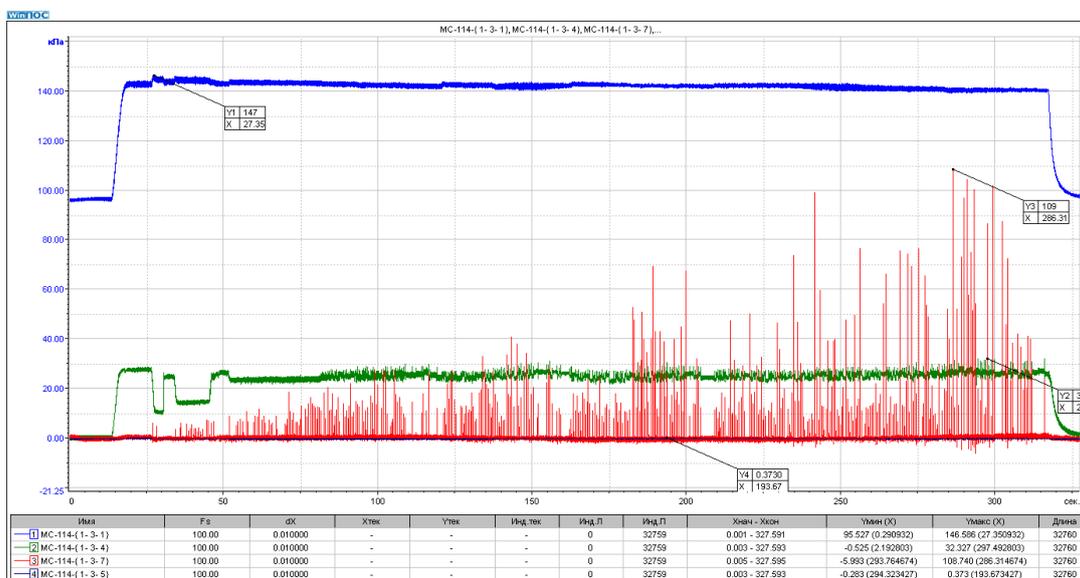
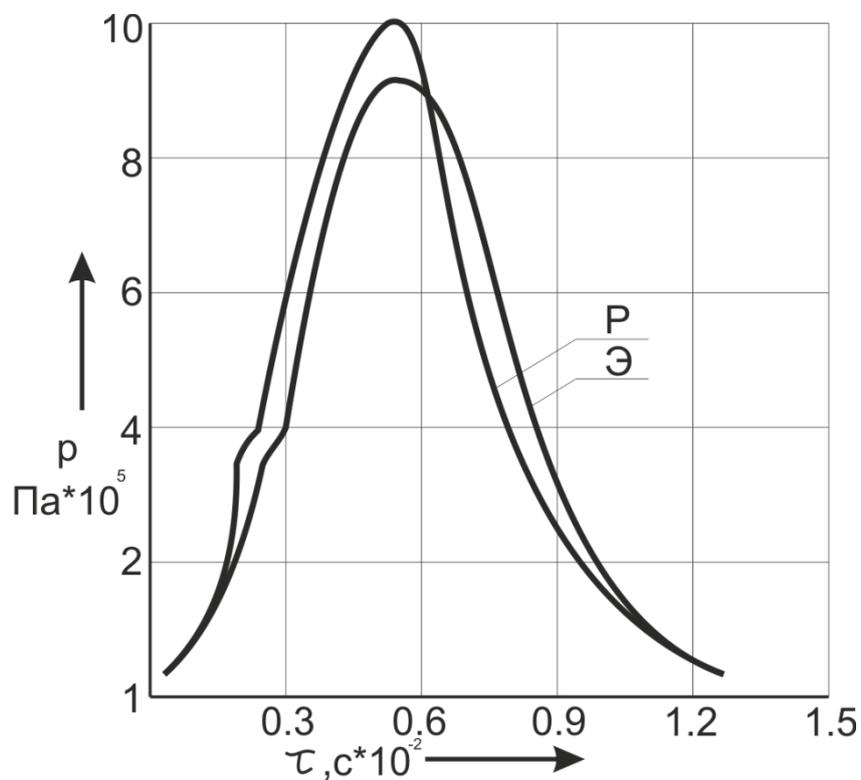


Рис.16 График изменения давлений на установке «Камерный стенд»

Термо-газодинамический расчет при импульсном сжигании топлива дал приблизительно одинаковые значения давления с экспериментом (рис.17).

В результате проведенных экспериментальных исследований установлено:

- для качественного образования топливовоздушной смеси топливную форсунку необходимо устанавливать перед обратным клапаном;
- термо - газодинамический расчет импульсного горения подтверждается натурными испытаниями, значения давления, полученные в результате расчета термодинамических параметров и в результате эксперимента примерно одинаковые;
- сходимость результатов составляет 94%.



Р - расчетные значения, Э - экспериментальные значения

Рис. 17 Сравнение значений давлений, полученных экспериментальным и расчетным путем

Библиографический список

1. Щипаков В.А Проблемы создания газотурбинного пульсирующего детонационного двигателя // Труды МАИ, 2013, №67: <https://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=41601>
2. Метечко Л.Б., Тихонов А.И., Сорокин А.Е., Новиков С.В. Влияние экологических нормативов на развитие авиационного двигателестроения // Труды МАИ, 2016, №85: <https://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=67495>
3. Установки газотурбинные. Термины и определения. ГОСТ Р51852. - М.: Изд-во стандартов, 2001. - 15 с.
4. Исаев А.И., Сафарбаков А.М., Богданович Д.В., Майрович Ю.И. Конструкция импульсной камеры сгорания для газотурбинного двигателя. Высокие

технологии, экономика, промышленность // Сборник статей Тринадцатой международной научно-практической конференции “Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности и экономике“, 2012, Санкт-Петербург, Т. 2, Часть 2, С. 67-71.

5. Исаев А.И., Сафарбаков А.М., Ходацкий С.А., Майрович Ю.И. Влияние геометрических характеристик завихрителя на вихревую структуру потока в импульсной камере сгорания // Труды МАИ, 2016, №88: <https://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=70631>

6. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента. - М.: Мир, 1972. - 381 с.

7. Исаев А.И., Молокова С.В. Термодинамика и теплопередача. - Иркутск: ИрГТУ, 2011. - 156 с.

8. Кобельков В.Н., Улас В.Д., Федоров Р.М. Термодинамика и теплопередача. – М: Изд-во: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2004. - 322 с.

9. Нечаев Ю.Н. и др. Теория авиационных двигателей. - М.: Воениздат, 1990. Часть 1. - 312 с.