

Рис. 5. Обобщенный результат испытаний второй группы

= 4.0 мм) скоростях спада. Минимальная задержка срабатывания 0.010 с получена при минимальной скорости спада перепада давлений от $\Delta P = 0.25 \text{ МПа}$ до нуля за время $\tau = 2.48 \text{ с}$. При спаде за время, близкое к реальному ($\tau = 0.3 \text{ с}$), задержка составляет уже $\Delta t_c = 0.042 \text{ с}$ и при дальнейшем уменьшении времени спада остается на этом уровне ($\Delta t_c = 0.040\ldots0.050 \text{ с}$), что свидетельствует о влиянии демпфера, отделяющего динамическую полость сигнализатора от трубопровода. Обобщенный результат испытаний второй группы представлен на рис. 5.

Сравнительный анализ результатов испытаний первой и второй группы показывает, что времена задержки срабатывания сигнализатора существенно отличаются. В первой группе $\Delta t_c = 0.003\ldots0.020 \text{ с}$, во второй — $\Delta t_c = 0.040\ldots0.050 \text{ с}$.

Различия условий проведения испытаний в следующем: в первой группе превышение давления в динамической полости над давлением, при котором срабатывает сигнализатор составляет 0.02—0.03 МПа, во второй — 0.08—0.09 МПа.

С учетом демпфера в конструкции сигнализатора эти различия в начальном давлении приводят к увеличению задержки примерно в два раза.

Проведенная исследовательская работа позволяет сделать следующие выводы. При скорости изменения давления $\Delta P = 0.9 \text{ МПа/с}$ время задержки срабатывания сигнализатора составляет $\Delta t_c = 0.042 \text{ с}$. Дальнейшее увеличение скорости спада давления не влияет на величину Δt_c , и она остается на уровне 0.040—0.044 с. (рис. 5). Минимальная величина $\Delta t_c = 0.010 \text{ с}$ зафиксирована при медленном (за 2.5 с) спаде давления в динамической полости. ($\Delta P = 0.125 \text{ МПа/с}$).

Указанное выше отсутствие зависимости задержки срабатывания сигнализатора от времени спада давления в трубопроводе при $\Delta P \geq 0.9 \text{ МПа/с}$ свидетельствует о влиянии демпфера отделяющего трубопровод от динамической полости.

1. Датчиковая аппаратура для телеметрии. / Под ред. Е. Е. Багдатьева. — М., 1970.—Кн. 1.

INVESTIGATION OF THE DELAY IN OPERATION OF THE SDD3-2S PRESSURE DROP INDICATOR

O. V. Lebedev, G. G. Martyukhin

Results of experimental investigations of the dependence of the delay in the operation of the pressure drop on the rate of the pressure drop change are presented. The tests showed that the value is variable and depend on the rate of the inspected pressure drop. The results obtained allow us to judge the influence of design features of a transmitter of this type on an important metrology parameter, namely, the delay of operation.

УДК 621.181.29:622.276.652

СИСТЕМА ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ДЛЯ КАМЕР СГОРАНИЯ РАБОТАЮЩИХ НА ТОПЛИВЕ ВОЗДУХ + КЕРОСИН

© Р. А. Марчан

Державне конструкторське бюро «Південне».

Експериментально показано, що організація локального горіння в резонаторній порожнині дає можливість суттєво покращити характеристики газодинамічних підпалювачів повітряно-газових паливних сумішей. Досягнуті параметри підпалювачів дозволяють говорити про реальність іншого практичного впровадження.

Воспламенение топливных смесей, несмотря на давность проблемы, по-прежнему является актуальной задачей. Оптимизация работы и расширение области применения горелочных устройств по-

стоянно создают спрос на все более совершенные системы зажигания. К сожалению, до сих пор не создана «идеальная» система зажигания, одинаково хорошо пригодная для всего разнообразия горелоч-

ных устройств. Среди известных способов зажигания — электрических, химических, каталитических, пиротехнических и прочих — каждый имеет такие случаи и области прикладного применения, где он оптимальен.

Статья посвящена газодинамическому способу зажигания. Газодинамическое зажигание основано на тепловых эффектах, происходящих в газоструйном излучателе звука гармонического типа [1]. Схема газодинамического нагревателя изображена на рис. 1.

Газодинамический нагреватель по схеме полностью аналогичен газоструйному излучателю звука [1], или, как его еще называют, статической сирене. Принцип работы устройства в следующем. Газ в виде недорасширенной струи истекает из сопла 1 и натекает на резонатор 2, который в простейшем случае представляет собой полый цилиндр, заглушенный с одного из торцов. Как известно, недорасширенная струя при свободном истечении на начальном участке имеет ячеистую структуру со сложной системой скачков уплотнения. При определенном расстоянии между срезом сопла и входным сечением резонатора взаимодействие системы скачков уплотнения приводит к образованию пульсирующего режима течения. Перед входом в резонатор образуется почти прямой скачок уплотнения, пульсирующий с частотой от единиц до десятков килогерц. В окружающее пространство и в полость резонатора с такой же частотой излучаются акустические волны высокой интенсивности. При относительной глубине полости резонатора $L/D = 0...2$, устройство используется как акустический излучатель звука. Тепловые эффекты в этом случае либо отсутствуют, либо незначительны ($T_{\text{нагр}} \leq 200^{\circ}\text{C}$). При относительной длине $L/D \geq 4$ вблизи торца резонатора происходит интенсивное нагревание газа. Уровень достигаемых температур составляет более чем 1500°C [2]. Основная причина появления теплового эффекта при увеличении L/D — это образование в полости резонатора вблизи торца

зоны с незначительным массо- и теплообменом с потоком газа из сопла (т. н. застойная зона). Механизм нагрева следующий. Давление газа в полости резонатора изменяется во времени по периодическому закону. Причем сжатие газа происходит скачкообразно, а последующее за ним расширение происходит плавно. Каждый цикл сжатия-расширения сопровождается повышением температуры. Газ, находящийся вблизи торца, вследствие малого массообмена с набегающим потоком из сопла, накапливает в себе тепло от каждого цикла сжатия-расширения. С ростом температуры возрастают тепловые потери через стенку резонатора в более холодные участки конструкции и в окружающую среду за счет излучения и конвекции. Через некоторое время прирост тепла и его потери уравновешиваются, и наступает стационарный режим, который характеризуется некоторой максимальной температурой нагрева $T_{\text{нагр}}^{\max}$. Эта величина в общем случае зависит от рода газа и его параметров, геометрических параметров и конструкции нагревателя, свойств материала резонатора (теплопроводность, степень черноты поверхности, теплоемкость, плотность и др.), условиями окружающей среды, в которой помещена нагреваемая часть резонатора. В качестве примера, иллюстрирующего динамику нагрева наружной поверхности резонатора, на рис. 2 показаны результаты замера температуры, полученные при продувках экспериментального газодинамического нагревателя, разработанного в ГКБ «Южное». Как видно, уровень достигаемых температур достаточен для воспламенения самых разнообразных топливных пар. Для инициирования горения можно использовать как горячий газ в полости резонатора, так и наружную поверхность резонатора.

Газодинамическое зажигание имеет ряд достоинств, позволяющих говорить о его перспективности:

- 1) простота конструкции и эксплуатации;
- 2) приемлемые массогабаритные характеристики;
- 3) возможность многократного срабатывания;
- 4) отсутствие специального электрооборудования;
- 5) возможность использования для разогрева газообразных компонентов топлива или газов, имеющихся в составе установки для целей, не связанных с зажиганием (газ из системы наддува, газ для стартовой раскрутки турбины, газ для продувок и др.);
- 6) возможность параллельного использования генерируемых акустических колебаний для интенсификации различных процессов (горение, смесеобразование и др.).

Однако есть и недостатки, существенно ограничивающие применение газодинамического зажигания.

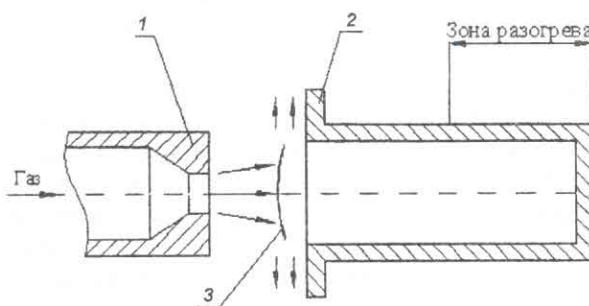


Рис. 1. Схема газодинамического нагревателя: 1 — сопло, 2 — резонатор, 3 — скачок уплотнения

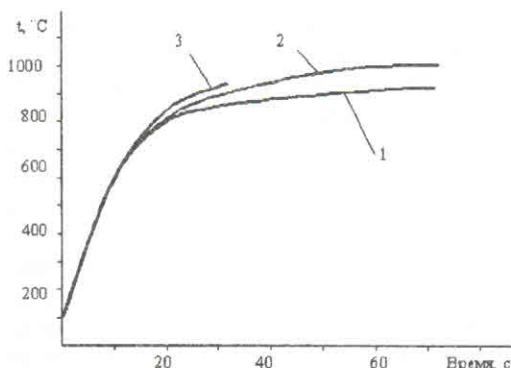


Рис. 2. Зависимость температуры наружной поверхности резонатора от времени: 1 — давление перед соплом 1.6 МПа; 2 — давление перед соплом 2.4 МПа; 3 — давление перед соплом 3.2 МПа

чивающие области возможного применения:

- 1) необходимость наличия газа со сверхкритическим перепадом давления;
- 2) инерционность работы (задержка воспламенения может достигать нескольких секунд);
- 3) проблема обеспечения стойкости материала резонатора при высоких температурах в окислительной среде;
- 4) высокие уровни шума.

Тем не менее, есть класс устройств, в которых газодинамическое зажигание выглядит особенно привлекательно на фоне известных и широко применяемых способов зажигания. Такими устройствами являются сверхзвуковые горелки, работающие на воздухе и углеводородных горючих. Они находят применение в факельных воспламенителях, в установках термического и термомеханического разрушения горных пород, в скважинных газогенераторах, в терморезаках, в устройствах газоструйного напыления и т. д. Как правило, в подобных горелках перед запуском проводят продувку газового тракта. При этом, а также непосредственно в процессе запуска до момента воспламенения, на смесительной головке срабатывает сверхкритический перепад давления, который исчезает после воспламенения. Наличие такого перепада можно использовать для организации газодинамического зажигания.

Практическая возможность создания такого рода систем зажигания подтверждена результатами теоретических и экспериментальных работ по воспламенению воздушно-керосинового топлива проведенных в ГКБ «Южное» в рамках контракта по созданию установки термического бурения горных пород. Экспериментальные исследования проводились в двух направлениях: зажигание смеси от горячего газа в полости резонатора (рис. 3) и зажигание от наружной поверхности резонатора

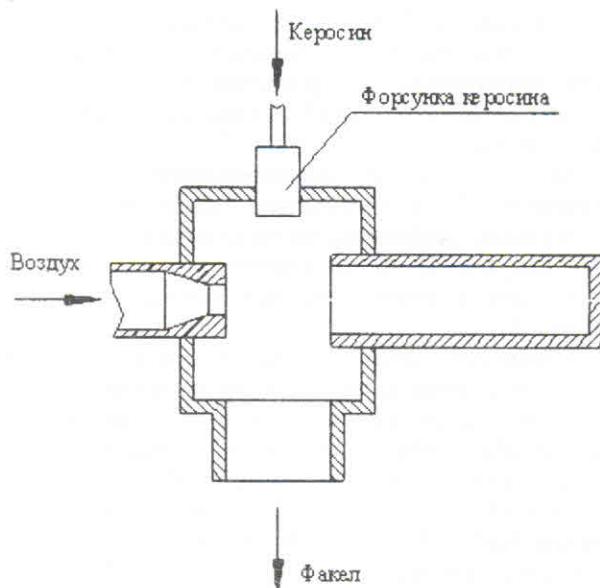


Рис. 3. Схема с воспламенением от горячего газа

(рис. 4). По каждому направлению было испытано несколько вариантов устройств, отличающихся геометрией резонаторов и газового тракта, а также типами форсунок.

В результате экспериментов по схеме на рис. 3 воздушно-керосиновую смесь воспламенить не удалось, однако было обнаружено одно интересное явление, которое было использовано впоследствии. После предварительного разогрева на воздухе и включения подачи керосина нагрев резонатора резко интенсифицируется. Это проявляется в повышении температуры наружной поверхности резонатора и увеличении площади зоны разогрева. Причем температура наружной поверхности до подачи керосина может находиться в пределах 300—400 °C, т. е. до начала ее свечения. После подачи керосина температура наружной поверхности за 1—3 с повышается до 1200 °C и более, что приводит к быстрому разрушению резонаторов, которые были изготовлены из стали 12Х18Н10Т. Объяснение этого эффекта, по-видимому, в наличии зоны локального горения внутри резонатора в области нахождения горячего газа. Так как эта область непосредственно соприкасается с холодным и значительно более мощным потоком из сопла, то, по всей видимости, энергии горения и газодинамического нагрева недостаточно для воспламенения остальной части смеси. Кроме того, поток топливной смеси между соплом и резонатором высокоскоростной и имеет значительную поперечную неравномерность по соотношению компонентов топлива. В комплексе перечис-

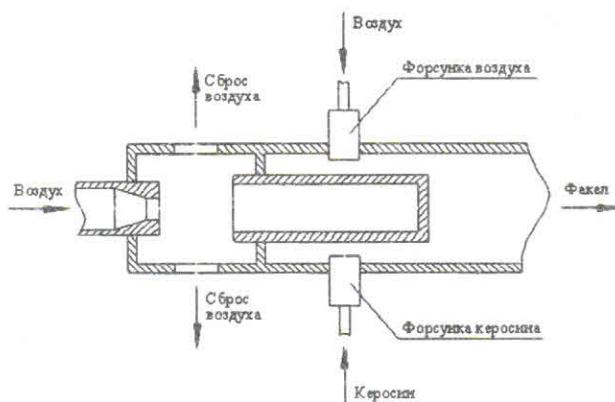


Рис. 4. Схема с воспламенением от нагретой поверхности

ленные факторы не позволяют воспламенить воздушно-капельную смесь по схеме на рис. 3.

В результате работ по схеме на рис. 4 удалось получить воспламенение топлива. При этом были получены следующие параметры:

- 1) воспламенение наступало при давлении воздуха перед соплом не менее 1.5 МПа;
- 2) массовый расход горючего в факеле 0.02—0.05 г/с;
- 3) массовый расход воздуха в факеле 0.25—0.75 г/с;
- 4) массовый расход воздуха на разогрев резонатора не менее 32 г/с;
- 5) доля массового расхода в факеле от расхода воздуха на разогрев не более 2.5 %;
- 6) время на разогрев резонатора не менее 10 с;
- 7) время от подачи керосина до момента воспламенения более 3 с.

Полученные результаты во многом связаны с габаритными ограничениями, накладываемыми на конструкцию воспламенителя в связи с возможностью компоновки его в составе камеры горения установки термического бурения. Достигнутые параметры воспламенителя говорят о том, что внедрение его в таком виде в эксплуатацию сопряжено с рядом проблем, среди которых главные — обеспечение столь малых стабильных расходов горючего, а также довольно высокий уровень давления и расхода разогревающего воздуха.

На основании экспериментальных данных было разработано еще одно направление исследований — варианты воспламенителей, которые являются сочетанием испытанных способов воспламенения. Схема одного из вариантов показана на рис. 5.

Топливная смесь образуется в зоне между соплом и резонатором. Часть топливной смеси используется для интенсификации нагрева резонатора, а ос-

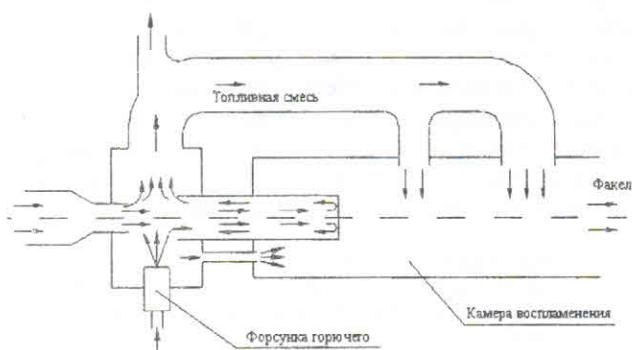


Рис. 5. Схема с интенсификацией нагрева воспламеняющей поверхности

тальной расход смеси ступенчато подается в камеру воспламенения. Расход смеси первой ступени подается к наружной разогретой поверхности резонатора и воспламеняется от контакта с ней. Полученный факел инициирует воспламенение следующих расходных ступеней. Для возможности регулирования мощности факела и параметров процесса воспламенения предусмотрена возможность отвода части смеси мимо камеры воспламенения. Для предотвращения частых разрушений резонаторов их нагреваемая часть изготавливается из материала ХН60ВТ. Результаты испытаний варианта, изображенного на рис. 5, на режимах, обеспечивающих воспламенение:

- 1) абсолютное давление воздуха перед соплом 0.57 МПа;
- 2) массовый расход воздуха 20 г/с;
- 3) массовый расход керосина 1.4 г/с;
- 4) коэффициент избытка воздуха 0.9—1.1;
- 5) время на предварительный разогрев воздухом 5 с;
- 6) время от начала подачи керосина до воспламенения 5 с;
- 7) доля расхода в факеле от суммарного расхода через воспламенитель — до 100 %.

При сравнении этих параметров с параметрами воспламенителя по рис. 4 видно, что уровень минимального входного давления удалось снизить в 2.6 раза, потребный массовый расход воздуха в 1.6 раза, расход в факеле можно увеличить в 27 раз (в зависимости от пропускаемого через камеру воспламенения количества смеси). По уровню давлений, расходов, габаритам воспламенитель по схеме на рис. 6 хорошо подходит под существующие типы горелок. Модернизация его в плане дальнейшего подбора материала резонатора и более рациональной организации подвода компонентов топлива в

камеру воспламенения позволит еще снизить уровень входных давлений и задержку воспламенения. Таким образом, создан экспериментальный газодинамический воспламенитель, схему которого можно оценить как перспективную при организации зажигания в горелочных устройствах, работающих на топливе воздух + углеводородное горючее при сверхкритических перепадах давления.

1. Источники мощного ультразвука. — М.: Наука, 1967.—Ч. 1.
2. Купцов В. М., Остроухова С. И., Филиппов К. Н. Пульсации давления и нагрев газа при втекании струи в цилиндрическую полость // Изв. АН СССР. МЖГ.—1977.—№ 5.
3. Пширембель К. Е., Флетчер Л. С. Исследование газодинами-

ческих и тепловых характеристик простой резонансной трубы // Ракетная техника и космонавтика.—1977.—15, № 1.

IGNITION SYSTEM FOR COMBUSTION CHAMBERS OPERATING ON AIR+KEROSENE PROPELLANTS

R. A. Marchan

We present results of experimental investigations of igniters using thermal effects in a resonance tube. The best characteristics are obtained for the igniter that uses burning of a part of fuel in the resonance cavity in order to intensify warming up of the igniting surface.

УДК 621.983

ИЗМЕНЕНИЕ ФОРМЫ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ПРОФИЛЕЙ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ГИБКОЙ ШПАНГОУТОВ С ТОНКОЙ СТЕНКОЙ

© Е. А. Джур¹, С. И. Вдовин², Н. Н. Убизький¹

¹Дніпропетровський національний університет

²Орловський технічний університет

Наведена методика чисельного визначення зміни форми перетину профілів з тонкою стінкою, які використовуються при виготовленні шпангоутів. Методика дозволяє значно підвищити точність виготовлення несучих елементів конструкцій виробів ракетно-космічної техніки.

При изготовлении шпангоутов применяется ротационное гнутис профильных заготовок, которые из конструктивных соображений изделий ракетно-космической техники могут иметь тонкую стенку (h — толщина стенки; L — ширина стенки, рисунок).

Для радиусов гнутия, характерных при производстве шпангоутов, профили, имеющие параметры стенки $h/L > 10$, относятся к разряду тонкостенных. Тонкие стенки профилей прогибаются в направлении нейтральной поверхности.

Рассмотрим искажение формы поперечного сечения конической стенки изогнутого профиля, изображенной на рисунке. Стенка прогнулась в направлении нейтральной поверхности, сместившись от своего номинального положения, показанного пунктиром, поэтому конической она названа условно.

Применим ортогональную систему координат α , θ , y и используем основные уравнения осесимметричных оболочек. Введем прямолинейную ортогональную систему координат x , y с началом в окрестностях незакрепленного края стенки. Координаты оси x , y служат как бы продолжением осей α , θ .

Напряженное состояние незакрепленного края

стенки принимаем линейным, следовательно, перемещения в этой части стенки связаны между собой следующим образом:

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} = \frac{\partial u_y}{\partial y} = -0.5\varepsilon_\theta, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} = -\frac{\partial u_y}{\partial y}. \quad (2)$$

Последнее соотношение следует из того, что деформация сдвига $\varepsilon_{xy} = 0$.

Тангенциальная деформация $\varepsilon_\theta = \varepsilon_0 + (x \sin \varphi_1 + y \cos \varphi_1)/r$, где ε_0 — значение ε_θ при $x = 0$, $y = 0$.

Интегрируем (1) с учетом выражения тангенциальной деформации:

$$u_x = -0.5x(\varepsilon_0 + y \cos \varphi_1/r) - 0.25x^2 \sin \varphi_1/r + f_1(y) + C_1,$$

$$u_y = -0.5y(\varepsilon_0 + x \sin \varphi_1/r) - 0.25y^2 \cos \varphi_1/r + f_2(x) + C_2,$$

где $f_1(y)$ и $f_2(x)$ — неизвестные функции.

Дифференцируем эти выражения согласно (2) и получаем $f_2(x) = 0.25y^2 \cos \varphi_1/r$. Меридиональная кривизна стенки на незакрепленном краю $k_1 =$