

П. А. ГАЛАЙДИН, Ю. Н. МУСТАФАЕВ, А. И. МУСТЕЙКИС

**ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ПРОЦЕССОВ
В ДЕТОНАЦИОННЫХ ТРУБАХ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИОНИЗАЦИОННЫХ РЕГИСТРАТОРОВ**

Использование управляемой детонации позволит создавать новые системы реактивного движения и энергетические установки. Для изучения процессов, происходящих в детонационной трубе, создан макет, в котором в качестве датчиков применены ионизационные регистраторы, а также эффективная схема измерения и фиксации полученных результатов.

Ключевые слова: ионизационный регистратор, детонация, измерение, проводимость, ударная волна, формирующий усилитель.

В настоящее время активно ведутся научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по использованию управляемой детонации в новых системах реактивного движения и других энергетических установках. Детонация — самый эффективный из всех возможных способов прямого сжигания вещества. По сравнению с прямоточным воздушно-реактивным двигателем с обычным горением двигатель, в котором использована детонация, способен обеспечить экономию топлива до 30 % [1].

Одной из главных проблем при создании импульсных детонационных двигателей (ИДД) является низкая детонационная способность топливно-воздушных смесей, пригодных для применения в летательных аппаратах (смеси пропана или керосина с воздухом). Эти смеси отличаются крайне высокой энергией инициирования детонации (порядка сотен килоджоулей), что не позволяет инициировать процесс детонации напрямую источником зажигания с мощностью, приемлемой для летательного аппарата. Использование подобных видов топлива в ИДД возможно только при использовании части топливно-воздушной смеси в процессе перехода медленного горения, инициируемого источником зажигания малой мощности, в детонацию в камере сгорания ИДД. Очевидно, что этот подход связан с потерей удельного импульса тяги двигателя, поэтому необходимо изучать влияние различных факторов на процесс превращения медленного горения в детонацию с целью минимизации преддетонационного расстояния и соответственно потерь удельного импульса тяги ИДД.

В классическом представлении детонация — это распространение по топливной смеси сложного трехмерного процесса, состоящего из детонационной волны и зоны реакции за ней. Детонационная волна распространяется по несгоревшей топливной смеси с постоянной скоростью, зависящей только от состава топливной смеси. Для представляющих практический интерес пропано-воздушной и керосино-воздушной смесей скорость распространения детонационной волны составляет примерно 1800 м/с [2, 3]. Достоверное измерение скорости горения и распространения детонации в детонационной трубе требует поиска оригинальных методов и способов.

Существует ряд способов измерения характеристик быстропеременных процессов. В настоящее время для точной регистрации скоростей процессов в детонационных трубах применяются методы

- фиксации распространения волн давления в детонационной камере с помощью акустических пьезоэлектрических датчиков давления;
- фиксации распространения фронта горения фотодатчиками;
- регистрации изменения показателя преломления газа (так называемый шпирен-метод, основанный на обнаружении оптических неоднородностей в прозрачных преломляющих средах и дефектов отражающих поверхностей, предложенный немецким ученым Теплером [4]).

Датчики акустического давления предназначены для измерения относительно малых уровней давления и имеют ограничения по температуре. Акустические датчики работают в диапазоне температур от -70 до $+200$ °С при воздействии избыточного медленноменяющегося давления до 0,2 МПа. Чувствительность датчика при изменении давления и температуры отклоняется на ± 30 %. Диапазон частот для данного типа датчиков составляет от 3 до 4000 Гц [5]. Эти ограничения приводят к механической неустойчивости при измерении скорости распространения детонации. Применение акустических датчиков показало, что данный метод неприемлем: после нескольких экспериментов датчики давления выходили из строя.

Использование оптического метода контроля позволяет получать достоверные результаты, однако при этом используется дорогостоящее измерительное оборудование, изменяющее сечение детонационной трубы. Кроме того, вследствие присутствия продуктов горения в детонационной камере изменяются и свойства канала оптического измерения [6]. Поэтому был выбран метод измерения, основанный на регистрации процессов ионизации.

Метод, описываемый в настоящей работе, заключается в фиксировании изменения электронной проводимости среды ионизационными регистраторами. В детонационной волне продукты горения, находящиеся под большим давлением при высокой температуре, сильно ионизированы и плотность электронов достигает 10^{17} — 10^{20} см $^{-3}$. При этом проводимость среды оказывается выше, чем проводимость полупроводников. В исходном состоянии пропано-воздушная и керосино-воздушная смеси являются хорошим изолятором. Эти свойства позволили разработать достаточно простые и эффективные ионизационные регистраторы (рис. 1).

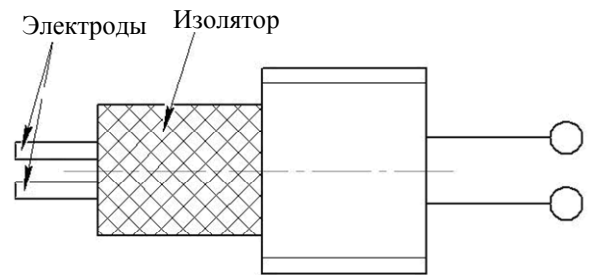


Рис. 1

Торцы двух электродов регистратора, вмонтированных в изолятор, устанавливаются в плоскости внутренней стенки детонационной трубы. Расстояние между электродами около 1 мм. Три ионизационных регистратора располагаются в детонационной трубе. На свечу подается электрический импульс, поджигающий горючую смесь в камере инициирования.

При прохождении фронта пламени по детонационной трубе ионизированный газ замыкает цепь между электродами, что приводит к резкому скачку напряжения в цепях регистраторов.

Ионизационные регистраторы соединены через конденсаторы малой емкости $C1$, $C2$ и $C3$ с входами формирующих усилителей. Конденсаторы предварительно заряжаются до напряжения питания через ограничивающие сопротивления $R1$, $R2$ и $R3$ (рис. 2).

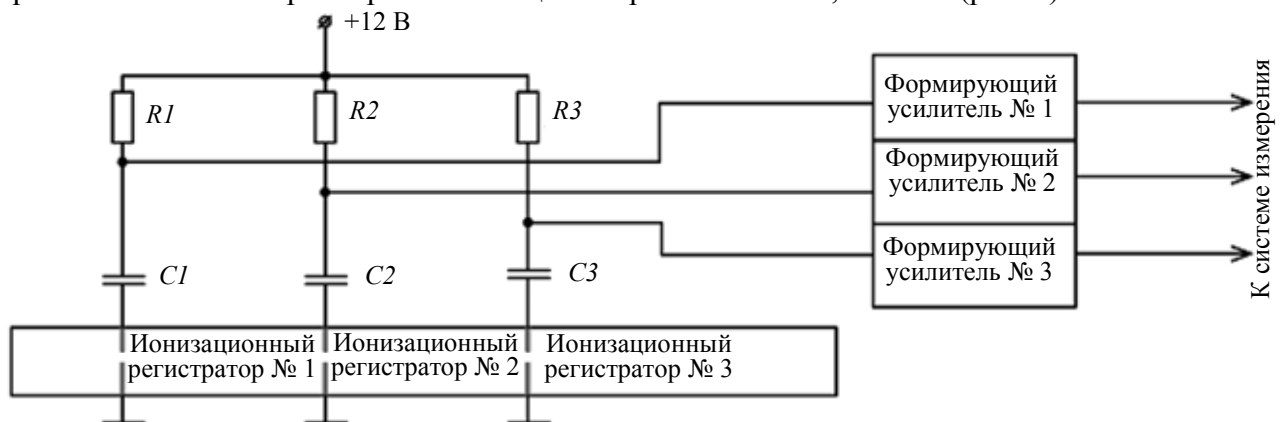


Рис. 2

В момент замыкания первого датчика ионизированным фронтом детонационной волны конденсатор $C1$ начинает разряжаться через ионизационный регистратор № 1 и входное сопротивление формирующего усилителя № 1. Возникает кратковременный (из-за малой

емкости конденсатора) импульс разрядного тока, который вызывает появление скачка напряжения на входе формирующего усилителя № 1. Параметры выходного сигнала (длительность, крутизна фронта нарастания) определяются значениями $R1$, $C1$ и степенью ионизации продуктов горения в детонационной трубе. Когда фронт детонации достигает ионизационных регистраторов № 2 и 3, аналогичные импульсы последовательно поступают на входы остальных формирующих усилителей.

Формирование сигналов осуществляется быстродействующими операционными усилителями с высоким входным сопротивлением и двухполярным питанием. Электрическая схема одного из формирователей приведена на рис. 3. Выход усилителя нагружен делителем $R4$.

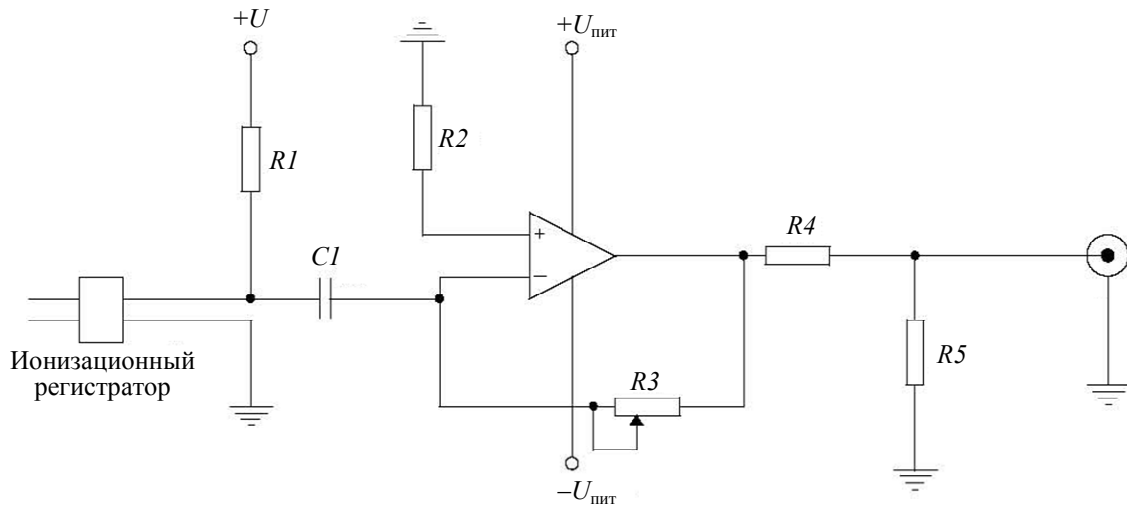


Рис. 3

Сигнал с резисторов $R5$ каждого из формирователей поступает на регистратор (см. рис. 2). Регистратор представляет собой персональный компьютер, в слоты расширения которого установлены три двухканальных быстродействующих (частота дискретизации 200 МГц)

осциллографа БОРДО 221 фирмы Аурус с единой схемой синхронизации, позволяющих фиксировать сигналы как в непрерывном, так и в ждущем однократном режиме. Синхронизирующий сигнал на запись поступает от схемы управления ионизирующей свечой.

На рис. 4 приведен пример осциллограммы показаний регистратора. Отчетливо виден пик напряжения в цепи при прохождении фронта ударной волны. Следующие за первым скачком колебания напряжения в цепи регистратора, регистрируемые за первым пиком, связаны с прохождением зоны турбулентного горения, следующей за фронтом пламени, в которой смесь имеет различную электронную проводимость. Измерив время между пиками сигналов и зная

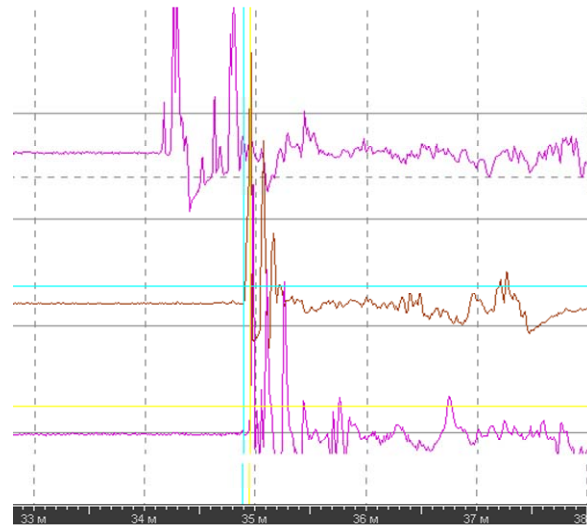


Рис. 4

расстояние между ионизационными регистраторами, можно вычислить скорость прохождения ударной волны.

Разработанный комплекс аппаратуры позволяет надежно и достоверно измерять скорость прохождения фронта ударной волны, что подтверждается многократными экспериментами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фролов С. М. Импульсное детонационное горение: новое поколение энергетических установок // Интеграл. 2008. № 3(41). С. 44—45.
2. Лоскутова Л. А., Егоров А. П., Козлов А. С. Определение скорости быстропротекающих процессов. Методические указания. СПб: СПбГТУ, 2002.
3. Даню Э., Фалемпа Ф., Кантен Г., Зито Р., Дебор Д. Импульсные детонационные двигатели: удельный импульс, сопла и входные устройства // Импульсные детонационные двигатели. М.: ТОРУС ПРЕСС, 2006. С. 447—474.
4. Валюс Н. А. Растровые оптические приборы. М., 1966.
5. Богуш М. В. Оценка механической надежности пьезоэлектрических датчиков акустических давлений в рабочем диапазоне температур // Приборы. 2008. № 11.
6. Kowalkowski M., Matsutomi Y., Heister S. Flame Sensing in Pulsed Combustion Using Ion Probes, Diodes and Visual Indications // 45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conf. & Exhibit. Denver, Colorado, 2009.

Сведения об авторах

- Павел Андреевич Галайдин** — д-р техн. наук, профессор; Балтийский государственный технический университет „ВОЕНМЕХ“ им. Д. Ф. Устинова, кафедра электротехники, Санкт-Петербург; E-mail: pag-N7@yandex.ru
- Юсиф Ниязович Мустафаев** — Балтийский государственный технический университет „ВОЕНМЕХ“ им. Д. Ф. Устинова, кафедра электротехники, Санкт-Петербург; доцент; E-mail: mustafaev@ss.ru
- Антон Иванович Мустейкис** — аспирант; Балтийский государственный технический университет „ВОЕНМЕХ“ им. Д.Ф. Устинова, кафедра электротехники, Санкт-Петербург; E-mail: a.musteykis@gmail.com

Рекомендована кафедрой
прикладной механики

Поступила в редакцию
15.04.10 г.