

В.П. БЕЛОВ

**ИСПЫТАНИЯ
РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ
НА ТВЕРДОМ ТОПЛИВЕ**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Балтийский государственный технический университет «Военмех»

В.П. БЕЛОВ

ИСПЫТАНИЯ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ТВЕРДОМ ТОПЛИВЕ

Учебное пособие

Санкт-Петербург
2020

УДК 621.454.3.018(075.8)
Б43

Белов, В.П.

Б43 Испытания ракетных двигателей на твердом топливе: учебное пособие / В.П. Белов; Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2020. – 45 с.

Рассматриваются методики измерения одного из важнейших внутриваллистических параметров РДТГ – скорости горения твердого топлива. Анализуются методы, реализуемые как в условиях реального двигателя, так и при использовании специальных установок на образцах топлива. Для каждого метода даются описания требуемого измерительного оборудования и проводится сравнение достоинств и недостатков метода.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлениям 24.03.01 «Ракетные комплексы и космонавтика», 24.05.01 «Производство и эксплуатация ракет и ракетно-космических комплексов» и 12.03.01 «Приборостроение».

УДК 621.454.3.018(075.8)

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. *В.В.Никольский* (ЛВКА им. А.Ф.Можайского); д-р техн. наук, проф. *В.А. Пинчук* (БГТУ)

*Утверждено
редакционно-издательским
советом университета*

© БГТУ, 2020
© В.П. Белов, 2020

ВВЕДЕНИЕ

Ракетные двигатели (РД) – важная составная часть любого летательного аппарата, относящегося к ракетно-космической технике. В составе летательного аппарата двигатели выполняют различные задачи: заданное перемещение в пространстве ракет и космических аппаратов (КА) (маршевые двигатели), старт (стартовые двигатели), маневры и увод КА на орбиту захоронения, коррекцию и стабилизацию КА в процессе функционирования на рабочей орбите, спуск КА и его частей на Землю и другие. Это определяет многообразие конструкций и требуемых выходных параметров РД.

Любой РД – сложная техническая система с большим числом элементов конструкции из различных материалов. Его функционирование сопровождается протеканием сложных внутренних процессов, среди которых можно отметить процесс горения ракетного топлива, газодинамические и тепловые процессы, процесс статических и динамических нагрузок на элементы конструкций и т.д. В процессе проектирования и конструирования любого двигателя используются многочисленные расчетные модели, описывающие внутренние процессы и поведение элементов конструкций в условиях высоких температур и скоростей движения газообразного рабочего тела и различных нагрузок.

Однако несовершенство расчетных моделей, недостаточно полные знания о закономерностях протекания внутренних процессов, неточность прогнозирования свойств используемых материалов не позволяют уверенно обеспечить выполнение требований по выходным параметрам проектируемого двигателя и надежность его функционирования. Поэтому в процессе создания двигателя совершенно необходимым этапом являются многочисленные испытания, призванные подтвердить ожидаемые параметры или дать конкретные рекомендации по их достижению. Следует отметить, что особенно возрастает роль испытаний при создании новых конструкций двигателей или при существенной модернизации реальных типов.

В данном пособии в основном уделяется внимание одному типу тепловых ракетных двигателей – ракетным двигателям на твердом топливе (РДТТ). Это определяется, прежде всего, многообразием различных сложных процессов, протекающих в данных двигателях, спецификой используемых материалов и широкой номенклатурой конструкций их элементов.

1. ВИДЫ ИСПЫТАНИЙ И ИХ НАЗНАЧЕНИЕ

1.1. Особенности испытаний РД

По сравнению с испытаниями других технических систем и агрегатов испытания РД имеют особенности, связанные со следующим.

1. *Многоплановость и информативность испытаний.* В процессе разработки и создания двигателей решаются различные целевые задачи, связанные с характеристиками и свойствами используемых материалов (ракетных топлив, конструкционных и теплозащитных материалов), анализом качества протекания внутрикамерных процессов и оценкой работоспособности элементов конструкции двигателей. Это определяет многообразие необходимых испытаний на всех этапах проектирования и конструирования каждого двигателя. В то же время важна высокая информативность каждого испытания и рациональность планирования испытаний, так как велики затраты на расходное топливо и невозможность, как правило, повторного использования сложной и дорогостоящей конструкции двигателя.

2. *Повышенная опасность при испытании работающего двигателя,* связанная с высокими внутрикамерным давлением, температурой и скоростью движения продуктов сгорания. Так, в современных РД давление в камере сгорания может достигать 20 МПа, скорость истечения продуктов сгорания на срезе сопла 3000...4000 м/с, а их температура в камере до 3500 К, а на срезе сопла 1000 К. На стадии отработки нельзя исключить возможность разрушения (взрыва) двигателя. Все это требует принятия особых мер по технике безопасности для обслуживающего персонала, т.е. автоматизированного управления испытанием и дистанционного управления измерительным процессом.

3. *Нестационарность многих процессов и малое время работы двигателей.* Время работы различных двигателей может меняться от долей секунд до нескольких сотен секунд. В этих условиях для анализа возможных режимов двигателя требуется автоматизация измерений с использованием быстродействующих автоматических управляющих систем и специальных средств измерения с малым разрешением во времени.

4. *Наличие силы тяги при работе двигателя.* Сила тяги двигателей может достигать десятков тысяч килоньютон. Это требует мощной системы крепления испытываемого двигателя на стапеле.

5. *Наличие высокотемпературной и высокоскоростной струи продуктов сгорания, истекающей из сопла работающего двигателя.*

Это определяет необходимость использования соответствующей защиты стендового и измерительного оборудования от разрушения при испытании.

6. *Использование измерительных средств.* Они должны надежно работать в условиях высоких давлений, температур и скоростей движения газа и возможных сильных вибрационных нагрузок.

7. *Необходимость обеспечения экологичности испытаний.* Образующиеся в процессе горения большинства ракетных топлив продукты сгорания токсичны. Защита обслуживающего персонала и окружающей среды является совершенно обязательным условием.

8. *Высокая стоимость испытаний.* Высокая стоимость испытаний определяется, в значительной мере, расходом топлива, частичным выходом из строя уникального испытательного оборудования и невозможностью использования двигателя для последующих испытаний.

9. *Обязательность огневых и летных испытаний.* Огневые испытания отвечают реальным условиям протекания внутренних процессов в РД. Невозможно оценить полностью работоспособность и выходные параметры двигателя на основании расчетов и «холодных» (без сжигания топлива) испытаний. Летные испытания должны окончательно подтвердить работоспособность РД в составе летательного аппарата в реальных условиях эксплуатации.

1.2. Классификация испытаний

1.2.1. Целевое назначение испытаний

По этому признаку можно выделить следующие типы испытаний.

Научно-исследовательские испытания. Большой объем таких испытаний проводится при разработке новых двигателей, а также при модернизации уже существующих конструкций. В этом случае обычно применяются новые более эффективные топлива и конструкционные и теплозащитные материалы, реализуются перспективные конструктивные решения, что приводит к необходимости уточнения внутрикамерных процессов, учета изменяющихся механических и тепловых нагрузок, влияния новых решений на выходные параметры двигателя и работоспособность его элементов конструкции.

Основная цель научно-исследовательских испытаний заключается в создании научного задела, позволяющего разрабатывать более совершенные РД и получать обоснованные рекомендации по улучшению характеристик и качества вновь разрабатываемых изделий. Про-

ведение таких испытаний на реальных двигателях или на полномасштабных моделях их основных узлов в большинстве случаев нецелесообразно вследствие больших затрат, сложности экспериментального оборудования, необходимости проведения сложных мероприятий по обеспечению безопасности и экологичности испытаний. Поэтому обычно проводится моделирование изучаемых процессов и конструкций (*модельные испытания*). Оно позволяет упростить установки, используемые для таких испытаний, реализовать их универсальность, т.е. возможность испытаний определенного класса различных двигателей, использовать единую информационно-измерительную систему.

Следует отметить, что полное моделирование обеспечить практически невозможно. Поэтому на практике используют частичное моделирование, при котором выдерживают равенство критериев подобия, основополагающих для изучаемого процесса, без учета тех критериев подобия, которые в конкретных условиях эксперимента не оказывают существенного влияния на изучаемый процесс.

В качестве примера научно-исследовательских испытаний можно привести испытания, связанные с изучением процесса горения твердого ракетного топлива. Они проводятся не на реальных зарядах, а на образцах топлива. Условия двигателя моделируются, прежде всего, по давлению в камере сгорания двигателя. Оно может создаваться и поддерживаться постоянным за счет наддува инертным газом камеры установки, в которой сжигается топливный образец. Такая установка (модель камеры сгорания двигателя) позволяет проводить исследования для различных топлив, при различных давлениях и начальных температурах и изучать различные характеристики процесса горения (скорость горения, температуру и структуру зоны горения, влияние различных факторов на процесс горения).

Конструкторские испытания. Их цель – оценка работоспособности узлов, агрегатов и систем двигателя, подтверждение его выходных и эксплуатационных характеристик, оценка уровня надежности двигателя. Для данных испытаний характерно несколько этапов.

Первый этап – *опытно-конструкторские испытания*. На этом этапе проводят начальную оценку работоспособности элементов конструкции, проверяют правильность заложенных конструктивных решений, выявляются слабые, уязвимые, места, предварительно оценивают основные параметры и характеристики и их соответствие техническому заданию. На данном этапе возможно вносить принципиальные изменения в конструкцию разрабатываемых узлов и их агрегатов. Сами

испытания проводятся только на реальных конструкциях разрабатываемых узлов и двигателя в целом, в наземных условиях с возможной имитацией реальных условий их работы.

Второй этап – *доводочные испытания*. В процессе их проведения принимают окончательное решение по всем узлам и агрегатам двигателя, подтверждают характеристики рабочих процессов и выходных параметров двигателя и их соответствие техническому заданию с учетом всех возможных воздействий внешних и внутренних факторов, оценивают работоспособность и надежность работы элементов конструкции двигателя. Испытания проводятся на реальных двигателях и их основных узлах и агрегатах. На этом этапе возможно лишь незначительные изменения конструкции отдельных элементов.

Следует отметить, что данные испытания достаточно объемные и затратные. Поэтому для их проведения совершенно необходимо разрабатывать план испытаний, который обеспечивал бы максимальную информативность каждого испытания и минимальные затраты на весь цикл отработки двигателя.

Третий этап – *приемосдаточные испытания*. Они подразумевают испытание разработанного натурального образца двигателя с целью подтверждения его основных технических и эксплуатационных характеристик и их соответствие тактико-техническому заданию. К этому типу можно отнести и контрольно-выборочные испытания, проводимые в случае изготовления серии двигателей. Из совокупности серийных двигателей выбирают контрольную партию и проводят подтверждение их характеристик тактико-техническому заданию.

Заключительный четвертый этап предусматривает *летные испытания* двигателя, работающего в составе летательного аппарата (ракеты, ракетносителя и т.д.) в реальных условиях его функционирования.

1.2.2. Условия проведения испытаний и степень соответствия объекта испытаний реальному двигателю

Испытания двигателей происходят в разных условиях. Их можно подразделить на следующие виды.

Наземные «холодные» испытания подразумевают решение частных задач по анализу внутренних процессов в двигателе и работоспособности его элементов конструкции без сжигания топлива. Примеры таких испытаний: испытания внутренних объемов отдельных элементов на герметичность, анализ коэффициента запаса прочности при действии статических и динамических нагрузок, гидравлические ис-

питания трубопроводов, клапанов и других элементов, оценка параметров распыла форсунок и т.д.

Наземные «огневые» испытания, проводимые при сжигании ракетного топлива и воздействии его продуктов сгорания на элементы конструкции, т.е. в условиях, близких к реальным условиям работы двигателя. Объектами таких испытаний могут быть как модельные двигатели и установки, отдельные узлы двигателя (сопла, камера сгорания, тепловая защита, воспламенительное устройство и т.д.), так и полномасштабные реальные конструкции, позволяющие оценить расходные и тяговые характеристики и надежность работы двигателя.

Для двигателей, функционирующих на больших высотах или в вакууме, при наземных испытаниях часто необходимо учитывать пониженное давление окружающей среды. Неучет этого фактора может привести к отрыву потока газа от стенки раструба сопла при работе двигателя в реальных условиях функционирования, что, в свою очередь, скажется на измеряемых параметрах двигателя (тяге, процессе воспламенения, тепловом режиме в двигателе и т.д.). Измерение реальных характеристик в этом случае можно обеспечить путем работы двигателя с применением барокамер, вакуумных насосов, эжекторов и выхлопных диффузоров [1].

Летные испытания, как уже отмечалось, проводятся для реального спроектированного двигателя в составе летательного аппарата в реальных условиях функционирования, соответствующих тактико-техническому заданию.

1.2.3. Используемое измерительное оборудование

Измерения характеристик и параметров как отдельных элементов конструкции, так и двигателя в целом, проводятся на различных стендах и экспериментальных установках. К ним предъявляют общие требования, заключающиеся в надежности крепления объекта исследования, в удобстве установки и монтажа требуемых средств измерения, обеспечении необходимого числа степеней свободы для элементов стенда. Следует обращать особое внимание на минимизацию возможных методических погрешностей измеряемых параметров. Однако в конкретных случаях измерения тех или иных характеристик и параметров к стендам и измерительным установкам могут предъявляться и другие требования с целью обеспечения высокой надежности и достоверности испытаний, например, требование по юстировке положения объекта испытания.

На практике используют следующие типы измерительного оборудования.

Стандартное оборудование, включающее стандартные измерительные стенды и стандартные измерительные средства, используемые при испытании любого вида техники. Примеры: стенды для испытаний на герметичность внутренних объемов, стенды для вибрационных испытаний, стенды для пневматических и гидравлических испытаний, вакуумные стенды. В таких стендах, как правило, используются стандартные измерительные средства: датчики давления, силы и температуры, вибрационные датчики, датчики расхода и т.д.

Специальные стенды и установки для экспериментального исследования и отработки именно ракетных двигателей. К ним относятся установки постоянного давления и объема для исследования процесса горения твердого топлива, установки для отработки теплозащитных покрытий с моделированием реальных условий теплового воздействия, гидравлические стенды для анализа гидравлических потерь в топливных магистралях и для исследования параметров распыла форсунок в жидкостных ракетных двигателях и другие.

Конструкции *стендов для «огневых» испытаний модельных и полноразмерных двигателей различного назначения* определяются типом двигателя, его выходными параметрами и требованиями к программе испытаний. Учитывая, что объектом испытания является реальный работающий двигатель, любой стенд должен обеспечивать надежность процесса испытания, целостность его оборудования и измерительных средств, автоматизацию процесса испытания и безопасность его проведения. Примеры таких стендов: стенды для измерения тяги, полного импульса и удельного импульса тяги, стенды для оценки потерь удельного импульса тяги и для исследования работоспособности тепловой защиты и др.

Следует отметить, что стенды для испытаний реальных полноразмерных двигателей – сложные инженерные сооружения, которые включают в себя собственно испытательные стапели, на которых крепится сам двигатель, технические средства установки и крепления двигателя, автоматизированный командный пункт, обеспечивающий управление процессом испытания и прием информации от средств измерительного комплекса, систему обеспечения безопасности испытаний.

Мы рассматриваем только «огневые» испытания, обуславливающие отличия испытаний ракетных двигателей от других видов технических устройств, в которых отсутствуют процессы горения топлив, специфические газодинамические и тепловые условия и которые не

характеризуются своеобразными выходными параметрами. Причем, основное внимание уделим испытаниям ракетных двигателей на твердом топливе, отличающихся разнообразием и оригинальностью используемых методик и средств измерения. Все эти испытания можно подразделить на три вида:

- определение внутриваллистических характеристик, связанных с внутрикамерными процессами;
- определение энергетических (тяговых) характеристик;
- оценка работоспособности элементов конструкции двигателя.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВНУТРИВАЛЛИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Внутриваллистические характеристики существенно влияют на выходные параметры двигателя. Основными из этих характеристик являются скорость горения топлива и уровень давления, реализуемого в камере сгорания. Связь выходных параметров двигателя с этими характеристиками можно проиллюстрировать следующим образом.

Один из важнейших параметров двигателя – его сила тяги. При проектировании двигателя обычно задается требуемая величина тяги. Общее выражение для тяги имеет вид

$$P = \dot{m}u_a + F_a(p_a - p_n),$$

где $\dot{m} = \frac{a_k p_0 F_{кр}}{\sqrt{R_r T_0}}$ – секундный массовый расход; –

$u_a = \sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot R_r \cdot T_0 \left[1 - (1/\epsilon_c)^{\frac{k-1}{k}} \right]}$ – скорость продуктов сгорания на

срезе сопла; $F_{кр}$ и F_a – площадь критического и выходного сечений сопла; p_0 и p_a – давление в камере сгорания и на срезе сопла; p_n – дав-

ление окружающей среды; $a_k = \sqrt{k} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}}$ – коэффициент в вы-

ражении для расхода; k , R_r и T_0 – характеристики продуктов сгорания – соответственно коэффициент адиабаты, газовая постоянная и температура; ϵ_c – степень расширения сопла по давлению.

Во всех двигателях требуемый уровень тяги обеспечивается за счет динамической составляющей (произведение секундного массового расхода на скорость на срезе сопла), так как эта составляющая

вносит основной вклад в величину тяги (более 95%). Анализ показывает [2], что для любого двигателя необходима максимально высокая скорость истечения, поскольку это позволяет во всех случаях уменьшить потребный секундный массовый расход и общую массу топлива для обеспечения заданной тяги, т.е. тяга оказывается пропорциональной расходу. Чем выше требуемая тяга, тем больший должен быть расход двигателя. С учетом того, что в РДТТ расход двигателя полностью определяется массой сгоревшего топлива за единицу времени, т.е. секундным массовым газоприходом, то в любой момент времени справедливо утверждение о равенстве этих величин. Газоприход зависит от плотности топлива, линейной скорости его горения и поверхности горения заряда: $\dot{P} = \rho_{\text{т}} S_{\text{г}} u_{\text{г}}$.

Следовательно, для обеспечения заданной тяги двигателя, а значит, и требуемого его расхода необходимы вполне определенные величины газоприхода и поверхности горения заряда. Для точного расчета требуемой поверхности горения важно знать величину скорости горения топливного заряда в конкретном двигателе. Скорость горения, в свою очередь, зависит от уровня давления в камере сгорания. Значит, для ее расчета необходимо знание величины давления в камере работающего двигателя. Эти две взаимосвязанные внутрибаллистические характеристики не поддаются точному расчету. Поэтому их реальные значения требуют экспериментального определения.

2.1. Обобщенная модель горения топлива и общее выражение для скорости его горения

Процесс горения твердого топлива – многостадийный процесс. Несмотря на определенные отличия [2] в процессе горения различных классов топлив (двухосновных, смесевых и топлив с наличием металлического горючего в своем составе), для нашего анализа можно воспользоваться обобщенной моделью горения. В такой модели учитываются все основные процессы преобразования исходного топлива в конечные продукты сгорания: многостадийность, наличие характерных участков в структуре зоны горения, также геометрические и тепловые характеристики этой зоны.

Первая стадия процесса горения характеризуется инертным прогревом топлива под действием внешнего теплового потока. Из-за низкой теплопроводности повышение температуры происходит только в поверхностном слое, в глубь топлива тепло не проникает. В конце

стадии температура достигает некоторого значения – температуры начала разложения топлива $T_{\text{пр}}$, которая характеризует начало первой реакции разложения одного из компонентов топлива. В этот период растёт и толщина прогреваемого слоя, в котором температура выше начальной температуры. В конце стадии толщина прогреваемого слоя достигает величины $\delta_{\text{прог}}$. В течение периода не изменяются физико-химические свойства топлива. Его структура также остаётся неизменной.

Вторая стадия – стадия разложения компонентов топлива, начинается при достижении на поверхности температуры $T_{\text{пр}}$. В целом процесс разложения любого твердого топлива – это совокупность последовательных химических реакций разложения сначала сложных, а затем все более простых химических соединений. Первые реакции являются реакциями разрыва связей в длинных цепочках молекул (например, нитроцеллюлозы, каучука, смолы). Затем последовательно происходит их разложение с образованием различных радикалов, разложение радикалов на малые молекулы типа NO_2 , NO , H_2 , Cl_2 , HCl , O_2 и др. Для протекания каждой из этих реакций требуется определённая температура, т.е. во время второй стадии также необходим приток тепла в топливо и дальнейший его нагрев. Заканчивается стадия при завершении последней реакции разложения. Это соответствует некоторой температуре T_S . В конце стадии исходное топливо полностью переходит в конечные продукты разложения, газообразные и конденсированные (частицы сажи, мелкие частицы расплавленного металла). Можно говорить, что при температуре T_S твердое топливо (конденсированная фаза) полностью перешло в газообразные продукты с взвешенными в ней мелкими конденсированными частицами (газовую фазу). Границу между конденсированной и газовой фазами принято называть поверхностью горения топлива, а температуру T_S – температурой поверхности горения. В целом, вся зона, в которой происходит разложение компонентов топлива, называется реакционной зоной в конденсированной фазе. Её толщина равна $\delta_{\text{рк}}$.

Завершающая третья стадия – стадия химического взаимодействия продуктов разложения топлива. Протекают многочисленные реакции между компонентами, содержащимися в продуктах разложения: $2\text{H}_2 + \text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O}$; $\text{Cl}_2 + \text{H}_2 = 2\text{HCl}$; $2\text{OH} + \text{H}_2 = 2\text{H}_2\text{O}$; $2\text{NO} + \text{C} = \text{N}_2 + \text{CO}_2$; $4\text{Al} + 3\text{O}_2 = 2\text{Al}_2\text{O}_3$ и др. Все эти реакции являются экзотермическими, при их протекании выделяется большое количество тепла. Реакции

происходят в интервале температур $T_S - T_0$, где T_0 – температура продуктов полного сгорания топлива. Зона протекания экзотермических реакций называется реакционной зоной в газовой фазе. Её толщина $\delta_{рг}$. В любой момент времени зона горения топлива имеет вид, представленный на рис. 1.

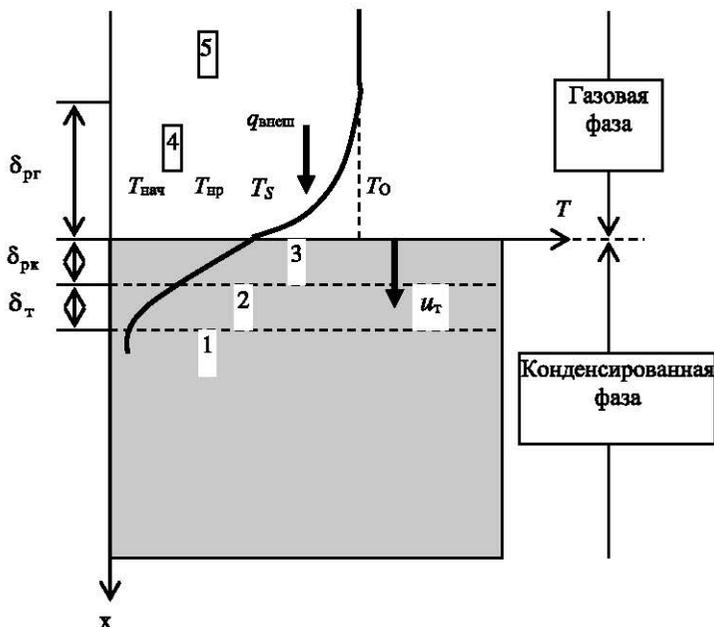


Рис. 1. Зона горения твердого топлива. 1 – исходное топливо; 2 – зона инертного прогрева; 3 – реакционная зона в конденсированной фазе; 4 – реакционная зона в газовой фазе; 5 – конечные продукты сгорания

Каждый слой топлива, начиная с поверхностного слоя заряда, последовательно проходит все три стадии, т.е. нагревается, разлагается, а затем продукты разложения химически реагируют друг с другом. Во времени эти процессы идут непрерывно и зона горения перемещается в глубь топлива. При неизменных внешних условиях это перемещение происходит с постоянной скоростью – линейной скоростью горения u_T . Именно с такой скоростью перемещается поверхность горения заряда. Для поддержания процесса горения необходима постоянная

ная подача тепла к поверхности горения для обеспечения нагрева и разложения последующих слоев топлива. При запуске двигателя внешний тепловой поток $q_{\text{внеш}}$ создается продуктами сгорания воспламенителя. После воспламенения поверхности заряда и образования высокотемпературной реакционной зоны газовой фазы тепловой поток к поверхности поступает именно из этой зоны. Можно говорить, что после воспламенения процесс горения поддерживает себя сам.

Процесс горения твердого топлива носит тепловой характер. Параметры зоны горения и величина скорости горения зависят от количества тепла, поступающего к поверхности горения из газовой фазы. Чем больше плотность теплового потока $q_{\text{внеш}}$, тем большая толщина топлива прогреется и разложится в единицу времени и тем больше будет скорость горения. Поэтому получить общее выражение для скорости горения можно из рассмотрения теплового баланса на поверхности горения.

Количество приходящего к поверхности тепла определяется плотностью теплового потока из газовой фазы, величиной поверхности и временем, в течении которого действует тепловой поток:

$$Q_{\text{прих}} = q_{\text{внеш}} S_{\Gamma} t.$$

Приходящее тепло расходуется на нагрев топлива от начальной температуры до температуры T_S и на разложение нагретой массы топлива:

$$Q_{\text{расх}} = Q_{\text{нагр}} + Q_{\text{разл}} = c_{\Gamma} m_{\Gamma} (T_S - T_{\text{нач}}) + m_{\Gamma} Q_{\text{р1}},$$

где c_{Γ} – удельная теплоёмкость топлива; m_{Γ} – масса топлива; $Q_{\text{р1}}$ – теплота разложения единицы массы топлива. Массу можно выразить через плотность топлива, поверхность горения и толщину прогретого и разложившегося слоя топлива. Тогда рассматриваемое условие баланса тепла будет иметь вид

$$q_{\text{внеш}} S_{\Gamma} t = \rho_{\Gamma} S_{\Gamma} h_{\text{сгор}} [c_{\Gamma} (T_S - T_{\text{нач}}) + Q_{\text{р1}}].$$

Учитывая, что отношение толщины слоя топлива, прогретого и разложившегося за время t , есть скорость горения, можно из этого равенства получить общее выражение для линейной скорости горения в следующем виде:

$$u_T = h_{\text{сгор}}/t = q_{\text{внеш}}/\rho_T [c_T(T_S - T_{\text{нач}}) + Q_{p1}] \cdot \quad (1)$$

Тепло к поверхности топлива поступает за счет теплопроводности из реакционной зоны газовой фазы. Тогда плотность теплового потока к поверхности приблизительно можно представить как

$$q_{\text{внеш}} = q_T = \lambda_T (T_0 - T_S)/\delta_{pT} \cdot \quad (2)$$

где λ_T – теплопроводность газовой фазы.

Анализ выражений (1) и (2) показывает, что скорость горения зависит от многих характеристик. Среди них можно выделить характеристики, связанные с составом топлива: температуры в зоне горения T_0 и T_S , теплофизические характеристики топлива и продуктов его разложения c_T , ρ_T , λ_T , тепловой эффект разложения топлива Q_{p1} и др. Кроме того, на величину скорости влияют факторы, определяющие внешние условия горения топлива. Среди них, прежде всего, следует отметить начальную температуру, давление в камере сгорания и скорость потока продуктов сгорания в случае обтекания им поверхности горения. Многие из этих характеристик не поддаются точному расчету. Сложно их определить и экспериментально. Поэтому точность расчёта скорости горения по выражению (1) чрезвычайно низка.

В практике проектирования двигателей для расчета скорости горения обычно используют эмпирические зависимости следующего типа:

• для учета влияния давления в камере сгорания линейную или степенную зависимости

$$u_T = a + bp_0, \quad u_T = U_1 p_0^\nu \cdot,$$

где коэффициенты U_1 , a , b и показатель степени ν зависят только от состава топлива. Для оценки влияния начальной температуры $T_{\text{нач}}$ скорость горения при любом ее значении рассчитывают по зависимости

$$u_T = U_1 p_0^\nu \cdot [B_T/B_T - (T_{\text{нач}} - 20^\circ \text{C})] \cdot,$$

где B_T – коэффициент температурной чувствительности скорости горения топлива, величина которого зависит также от состава топлива. Разработчики топлива должны определить эти константы и внести их значения в паспорт каждого конкретного топлива.

Как известно [2, 3], одним из факторов, влияющих на скорость горения твердого топлива, является скорость газового потока, обдувающего поверхность горения. Это влияние своеобразно. При скорости газового потока меньше некоторого значения u_* влияние отсутствует. При скорости газа больше u_* влияние имеет место, причем, чем больше скорость газа, тем значительнее становится скорость горения топлива. Горение топлива при условии $u_r > u_*$ носит название эрозионного горения. Скорость u_* называется пороговой скоростью газового потока, так как она является границей (порогом) начала влияния скорости газа на скорость горения топлива. Величина u_* зависит от марки топлива. Для каждого топлива необходимо знать её величину, так как если в двигателе реализуется эрозионное горение топлива, то газоприход в камере будет повышенный и изменятся внутривалли-стические и выходные характеристики двигателя. Этот эффект учитывают при проектировании двигателя, используя эмпирическое соотношение

$$u_r = U_1 p_0^{\nu} n \left(\frac{u_r}{u_*} \right)^m, \quad (3)$$

где величина коэффициентов n и m зависит от состава топлива и является его паспортной характеристикой.

Значение реальной скорости газового потока u_r нетрудно рассчитать при известных геометрических размерах камеры сгорания и заряда. Например, в зазоре между камерой сгорания диаметром D_k и цилиндрическим зарядом, горящим по наружной поверхности диаметром D , скорость газового потока увеличивается пропорционально продольной координате. Минимальная скорость в зазоре будет у переднего среза заряда, максимальная – у соплового торца. Изменение скорости газа в зазоре по продольной координате x в этом случае нетрудно определить из условия равенства газоприхода и расхода газа в рассматриваемом зазоре с учетом давления в камере и паспортных характеристик топлива. Для рассматриваемого случая эта зависимость будет иметь вид

$$u_r = \frac{4\rho_r U_1 R_r T_0}{p_0^{1-\nu}} \cdot \frac{Dx}{D_k^2 - D^2}. \quad (4)$$

Таким образом, необходимые для проектирования двигателя данные по скорости горения топлива и по влиянию на ее величину различных

факторов можно получить с высокой точностью только опытным путем с помощью специальных экспериментальных методик.

2.2. Методы экспериментального определения скорости горения топлива

Для определения скорости горения твердого топлива используют единый подход, основанный на измерении толщины сгоревшего слоя топлива за фиксированный промежуток времени:

$$u_{\tau} = e/\Delta t . \quad (5)$$

Различные способы отличаются методами определения толщины сгоревшего свода e и условиями проведения эксперимента. Методы измерения можно подразделить по следующим признакам.

По условиям проведения измерения:

- измерение в реальных или модельных двигателях с реальными или близкими к реальным формам зарядами;
- измерение в специальных установках на образцах топлива.

По степени воздействия чувствительного элемента измерительного устройства на горящее топливо:

- контактные методы, в которых чувствительный элемент находится в непосредственном контакте с топливом, что определяет возможность его воздействия на процесс горения и величину скорости;
- бесконтактные методы, когда воздействие на процесс горения отсутствует.

По задаче исследования:

- измерение стационарных скоростей, когда отсутствует какое-либо требование к временному интервалу измерения Δt ;
- измерение нестационарных скоростей, для которых требуются малые промежутки Δt и целый ряд измерений в течение сгорания заряда или образца топлива.

Рассмотрим существующие методы измерения.

2.3. Методы измерения в двигателях

Определение скорости горения по диаграмме давления. Диаграмма давления – это изменение давления в камере сгорания во времени. На типичной диаграмме (рис. 2) можно выделить три характерных участка.

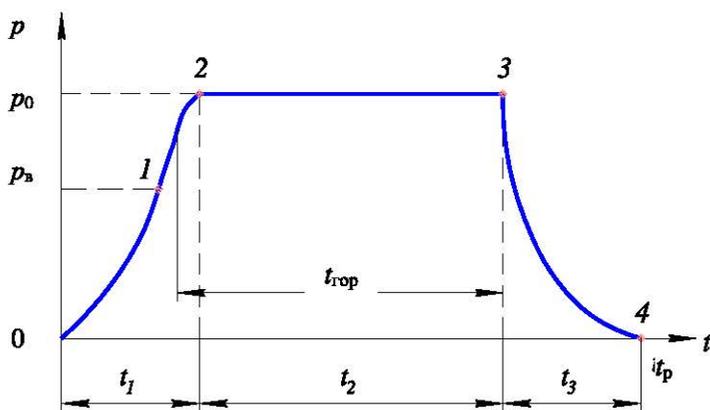


Рис. 2. Диаграмма давления в камере сгорания

Начальный участок длительностью t_1 является периодом выхода на режим. Момент времени $t = 0$ соответствует загоранию воспламенительного состава. Его продукты сгорания заполняют камеру, в результате чего в ней начинает расти давление. Сам воспламенитель способен поднять давление в камере до некоторой величины $p_в$, которая может составлять 60...90% от предельного (стационарного) давления p_0 в зависимости от массы воспламенительного состава и свободного начального объема камеры. На участке 0-1 заряд еще не горит.

Для загорания заряда требуется определенное время, чтобы прогрелся поверхностный слой топлива и произошло разложение компонентов топлива. Тепло, необходимое для этого, поступает к поверхности заряда от продуктов сгорания воспламенителя. Заряд загорается в точке 1, и дальнейшее повышение давления на участке 1-2 определяется дополнительным газоприходом от горения топлива. Горение заряда не начинается мгновенно по всей поверхности. Первой загорается его часть, расположенная вблизи воспламенителя. Как правило, это область переднего днища камеры, где и находится воспламенитель. Наиболее удаленная от воспламенителя часть, в районе соплового днища, загорается в последнюю очередь. Следовательно, на рассматриваемом участке происходит постепенное включение в горение поверхности заряда и в точке 2 заряд начинает гореть по всей поверхности.

Следующий участок 2–3 является основным и наиболее длительным (время t_2). Он соответствует горению заряда по всей поверхности, а точка 3 определяет полное сгорание топлива. Если поверхность горения заряда не меняется за время работы двигателя, то и давление на этом участке остается постоянным. При переменности поверхности соответствующим образом меняется и давление.

В точке 3 заряд полностью сгорел, а вся камера оказывается заполненной продуктами сгорания при давлении p_0 . На участке 3–4 падение давления происходит за счет истечения продуктов сгорания через сопло. В конце участка давление в камере сравнивается с давлением окружающей среды. Этот период работы двигателя носит название периода последействия.

По диаграмме давления не трудно определить время сгорания заряда $t_{\text{гор}}$. При этом необходимо учитывать, что нельзя точно зафиксировать время начала горения заряда. Момент завершения его горения также не всегда можно определить точно, особенно при непостоянстве поверхности горения во времени. Следовательно, по *диаграмме давления время сгорания* заряда определяется с достаточно большой погрешностью.

Гораздо более точно можно установить толщину сгоревшего за время $t_{\text{гор}}$ слоя топлива. Её принято называть полной толщиной свода горения заряда e_1 . Для любой формы заряда e_1 можно рассчитать по геометрическим размерам заряда. Например [2], для одноканальной цилиндрической шашки $e_1 = (D - d)/4$, где D – наружный диаметр заряда, а d – диаметр внутреннего канала.

Для вычисления скорости горения по формуле (5) необходимо измерить исходные размеры заряда и во время работы двигателя зафиксировать изменение давления во времени, т.е. получить экспериментальную диаграмму давления.

Достоинства метода:

- 1) скорость измеряют непосредственно в двигателе с использованием реальной формы заряда;
- 2) простота конструктивной реализации метода. Необходимо только иметь сквозное отверстие в камере сгорания для установки датчика давления;
- 3) отсутствует вмешательство в процесс горения топлива.

Недостатки метода:

- 1) невозможность измерения меняющейся во времени скорости.

Метод позволяет определять среднюю за время сгорания заряда скорость;

2) осреднение скорости по длине заряда. Метод не позволяет измерить скорость на различных участках поверхности заряда, что важно, например, при исследовании влияния скорости газового потока на скорость горения;

3) невысокая точность измерения скорости, определяемая, в основном, погрешностью измерения времени сгорания заряда. Погрешность тем больше, чем меньше время работы двигателя.

При измерении скорости горения с использованием прерывателя горения горение заряда прекращается в определенный момент времени после начала работы двигателя. Измеряя геометрические размеры погашенного заряда, можно определить величину сгоревшего свода к моменту гашения. Появляется возможность рассчитать среднюю скорость горения за время горения заряда до гашения. Время гашения можно задавать перед экспериментом, поэтому усреднять скорость можно для весьма малых промежутков времени (до долей секунды).

Гашение производится с помощью специального прерывателя (рис. 3). Конструкция двигателя с зарядом 1 в виде одноканальной цилиндрической шашки почти полностью соответствует традиционной схеме РДТТ. В цилиндрической камере сгорания 2 располагается заряд, опирающийся на кольцевой упор 6 нижнего днища 7. Со стороны сопла 5 заряд подпирается диафрагмой 4, которая поджимается сопловым днищем 3. Воспламенитель 12 располагается в передней части камеры. Отличается от традиционной конструкции только переднее днище. Оно скреплено с камерой резьбой и имеет в центре отверстие диаметром D_1 , в которое по посадке вставляется специальный поршень 8. В состав поршня входит самоуплотняющееся устройство, обеспечивающее герметизацию внутреннего объема камеры. Поршень закреплен относительно переднего днища с помощью пальца 9. В отверстии поршня, куда вставлен палец, располагается навеска пороха 10. Линия воспламенения для нее проходит через небольшое сквозное отверстие в пальце. Нижнее днище имеет фланец для крепления двигателя на рабочем столе стапеля 11. Во фланце также имеется отверстие диаметром D_2 . Необходимо обеспечить условие $D_2 > D_1 > D$.

Основным способом гашения твердого топлива является резкий сброс давления в камере двигателя. Экспериментальные и расчетные данные показывают, что требуемая для гашения скорость сброса дав-

ления зависит от типа топлива и уровня начального давления в камере перед сбросом [3]. Условие гашения для конкретного топлива можно записать как

$$\frac{1}{p_0} \left| \frac{dp}{dt} \right|_{\text{нач}} > B. \quad (6)$$

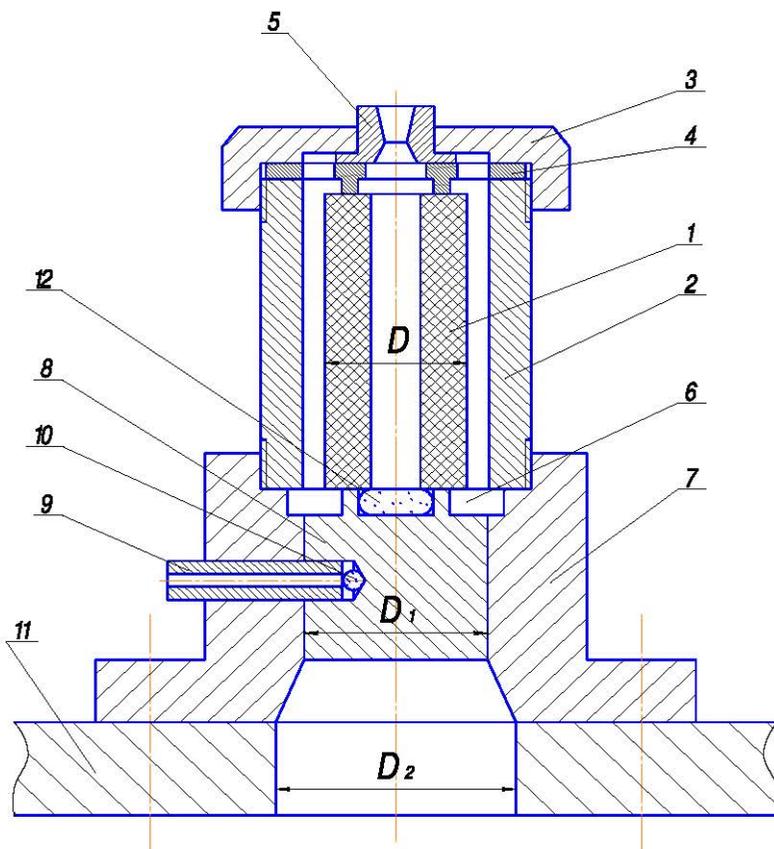


Рис. 3. Прерыватель горения

Для надежного гашения величина градиента падения давления, отнесенного к уровню давления в камере перед сбросом, должна быть больше параметра B . Его величина зависит от типа топлива и составляет $100 \dots 200 \text{ с}^{-1}$ [5]. Это соответствует градиенту падения давления $10^2 \dots 10^3 \text{ МПа/с}$.

Процесс гашения топлива можно представить следующим образом. При подаче электрического сигнала и загорании навески пороха давлением выбивается палец. Исчезает жесткая связь поршня и нижнего днища двигателя. Давлением продуктов сгорания в камере сгорания поршень, в свою очередь, выбивается и вылетает через отверстие диаметром D_2 в днище. В результате продукты сгорания начинают истекать через освободившееся дополнительное отверстие. Давление в камере резко падает. Начинается интенсивный отток газа от поверхности горения топлива в пределах реакционной зоны газовой фазы. Область конечных продуктов сгорания с температурой T_0 быстро удаляется от поверхности горения, возрастает толщина реакционной зоны в газовой фазе и резко уменьшается плотность теплового потока к поверхности топлива. Поступающего тепла становится недостаточно для прогрева и разложения новой порции топлива. Процесс горения прекращается, и заряд гаснет. Погасший заряд под действием собственного веса падает вниз и попадает в специальную ёмкость с водой, что предотвращает возможность его повторного воспламенения. Если заряд оставить в камере сгорания, то после гашения он снова может прогреться под действием теплового потока, идущего от нагретых элементов конструкции двигателя, и воспламениться.

Для реализации метода необходим командный прибор с реле времени, обеспечивающим срабатывание прерывателя горения в заданный момент времени после начала работы двигателя. Точность определения этого момента можно повысить, если фиксировать давление в камере во время его работы. На диаграмме давления время гашения заряда находится по моменту резкого падения давления.

Методика с использованием прерывателя горения позволяет исследовать процесс эрозионного горения топлива в двигателе и оценить пороговую скорость газового потока для конкретного топлива. Для этого в двигателе необходимо обеспечить большие скорости движения газового потока, превышающие пороговое значение, которое для разных топлив составляет 80...130 м/с.

Если спустя небольшое время после начала работы двигателя погасить заряд, то его поверхность будет иметь профиль, показанный на рис. 4. В момент гашения заряда поверхность останется цилиндрической с диаметром D_1 только в пределах участка $0 \div x_*$, а далее на участке $x_* - L_3$ будет близка к конической форме. Это означает, что на первом участке отсутствует эрозионное горение, топливо горит с постоянной скоростью u_T и не изменяется толщина сгоревшего сво-

да. На втором участке толщина сгоревшего свода увеличивается, достигая максимального значения на сопловом срезе заряда. Соответственно увеличивается и скорость горения топлива. Причина – эрозионное горение. Значит, точка $x = x_*$ является границей между обычным (безэрозионным) и эрозионным горением. Построив зависимость (4) и входя в неё значением x_* , определяемым по результатам анализа погашенного образца, можно рассчитать значение пороговой скорости (рис. 4).

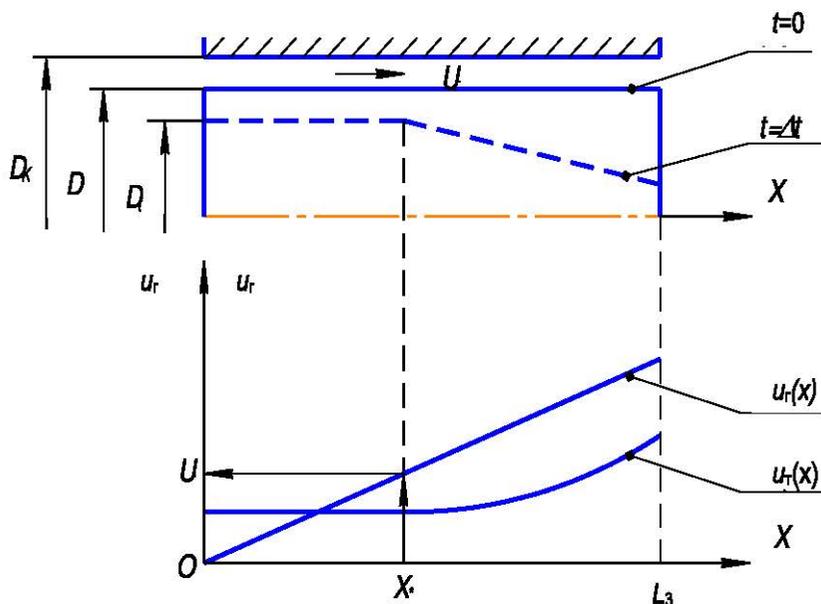


Рис. 4. Определение пороговой скорости газового потока: — — начальное положение поверхности заряда; - - - - поверхность после гашения

Что касается скорости горения, то её зависимость от продольной координаты может быть определена на основании измерения толщины сгоревшего свода при разных значениях x для погашенного заряда. Однако следует иметь в виду, что скорость горения – средняя за время горения заряда. В течение этого времени уменьшается скорость газового потока и в соответствии с этим скорость горения меняется от максимума в начальный момент до минимума в момент гашения за-

ряда.

Достоинство метода:

- 1) отсутствие вмешательства в процесс горения;
- 2) возможность определения средней скорости горения за малый промежуток времени;
- 3) возможность определения изменения скорости горения во времени при проведении серии экспериментов с разными временами срабатывания прерывателя;
- 4) возможность определения скорости горения по длине заряда, т.е. эрозионной скорости горения.

Недостатки метода:

- 1) усложнение конструкции двигателя за счет прерывателя горения;
- 2) невозможность использования для всех типов твердого топлива. Высокоэнергетические металлизированные смесевые топлива трудно погасить из-за значительного тепловыделения в реакционной зоне конденсированной фазы. Этого тепловыделения оказывается достаточно для повторного воспламенения топлива;
- 3) низкая точность измерения скорости из-за погрешностей определения времени горения заряда по диаграмме давления и особенно толщины сгоревшего слоя топлива. Последняя погрешность обусловлена тем, что при резком сбросе давления скорость выгорания топлива не может мгновенно упасть до нуля из-за инерционности конденсированной фазы. Следовательно, какая-то небольшая часть топлива будет выгорать всё с уменьшающейся скоростью. Эту долю трудно выделить в общей толщине сгоревшего свода.

В методе фоторегистрации для определения нестационарной скорости горения используется модельный двигатель с прозрачными оптическими окнами и специальным зарядом (рис. 5). Камера двигателя 1 имеет прямоугольную форму. Вдоль неё по боковой поверхности с двух сторон располагаются прямоугольные вырезы, которые закрываются оптическими окнами 2. Окна, изготовленные из кварца, плотно прижимаются накладками 8. Герметизация камеры обеспечивается уплотнительными прокладками 9.

Заряд состоит из двух плоских пластин 3. Ширина пластин соответствует расстоянию между окнами, а толщина их определяется требуемым временем работы двигателя. Пластины топлива приклеиваются к корпусу камеры и с боков поджимаются окнами. Поэтому горение заряда происходит только по внутренним поверхностям пластин. Продукты сгорания протекают к соплу 4 по прямоугольному

каналу толщиной h .

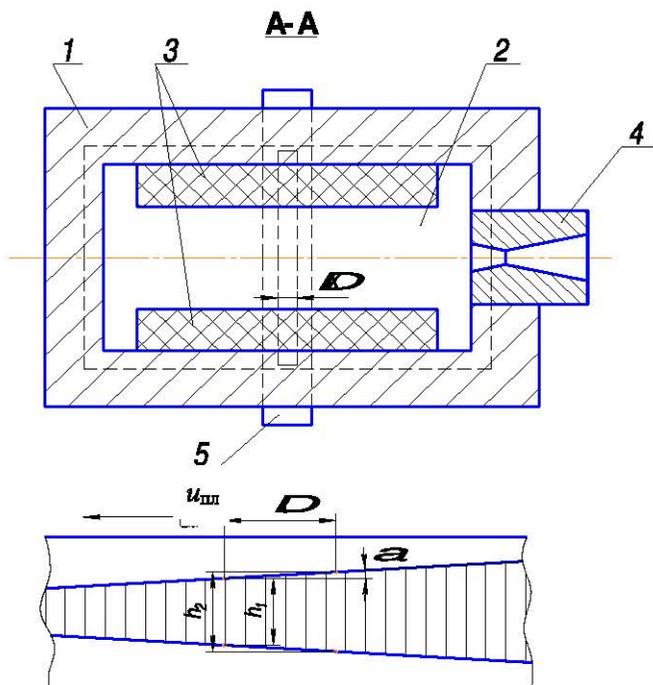
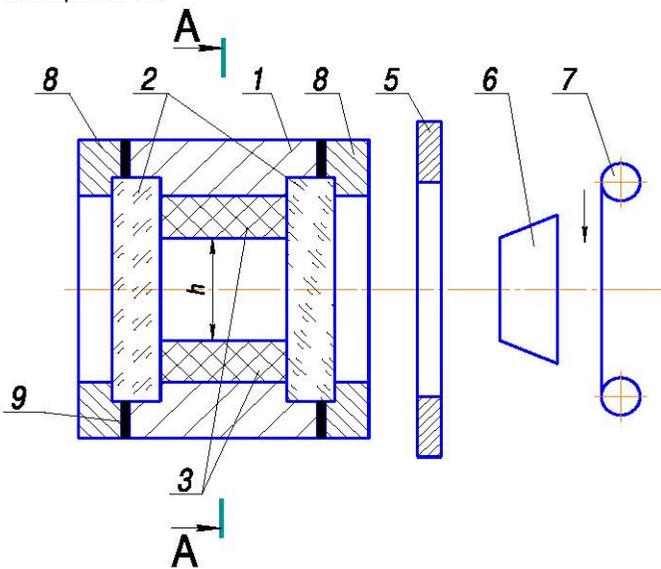


Рис. 5. Метод фоторегистрации

На двигающуюся фотопленку 7 фиксируется излучение от высокотемпературных продуктов сгорания, заполняющих внутренний объем камеры между пластинами топлива. На пленке регистрируется засвеченная полоса, соответствующая этому объёму. Границы полосы отвечают границам поверхности горения заряда. Так как по мере сгорания топлива увеличивается размер канала h , то на непрерывно движущейся пленке фиксируется расширяющаяся полоса. Если в какой-то момент времени размер канала h_1 , а через некоторое время Δt его величина стала равной h_2 , то скорость горения топлива будет равна

$$u_{\tau} = \frac{h_2 - h_1}{2\Delta t} \cdot k = ktg\lambda ,$$

где k – коэффициент увеличения оптической системы; α – угол наклона образующей полосы засветки на рассматриваемом участке.

Для фокусировки излучения и получения четкой границы полосы засветки (поверхности горения) применяется фотообъектив 6. Чтобы не было осреднения скорости горения по всей длине заряда, в эксперименте фиксируется излучение от узкой полоски канала шириной Δx , вырезаемой специальной оптической щелью 5.

Таким образом, метод позволяет фиксировать скорость горения топлива с малым разрешением как во времени, так и по координате x , т.е. измерять нестационарную скорость горения и распределение её по продольной координате.

Для фиксации излучения вместо киноплёнки можно использовать цифровую кинокамеру с последующей обработкой результатов съёмки на ПК.

Достоинства метода:

- 1) возможность измерения нестационарной скорости горения;
- 2) возможность анализа измерения скорости по продольной координате;
- 3) измерение скорости происходит в условиях модельного двигателя, близких к условиям горения топлива в камере сгорания реального двигателя.

Недостатки метода:

- 1) сложность конструкции двигателя и герметизации объёма камеры сгорания;
- 2) возможность неравномерного выгорания поверхности пластин вследствие краевого эффекта в зоне контакта топлива с оптическими окнами. В этой зоне из-за потерь тепла в материал окон возможно

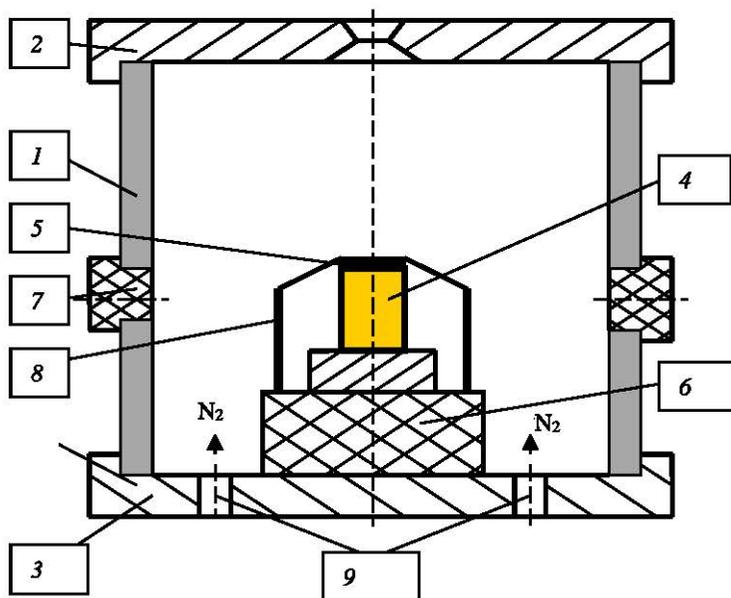
снижение скорости горения.

2.4. Методы измерения скорости в модельных установках

Измерение скорости горения непосредственно в двигателях чаще всего требует усложнения его конструкции за счет дополнительных элементов, необходимых для крепления двигателя и реализации выбранного метода измерения. Кроме того, в этом случае имеет место расход топлива, особенно значительный при проведении серии испытаний для определения влияния различных факторов на скорость горения. Также следует иметь в виду, что после каждого испытания приходится заново подготавливать двигатель к новому испытанию, заменяя отдельные его части (тепловую защиту, элементы оптической системы, узлы крепления заряда и другие). Такие трудоемкие и затратные испытания можно заменить более простыми, в которых скорость измеряется с использованием небольших образцов топлива в условиях, моделирующих реальные условия ракетного двигателя. Данный подход наиболее целесообразен для получения паспортных характеристик для вновь разрабатываемых рецептов топлив, когда требуется проведение большой серии испытаний.

Для таких испытаний используют специальные установки. В них горение образца происходит при повышенном давлении, характерном для двигателя. Давление может создаваться двумя способами. В установках постоянного давления (УПД) (рис. 6) оно обеспечивается за счет подачи газа во внутренний объем установки из баллонов высокого давления. Во избежание влияния на процесс горения применяют инертные газы (азот или гелий). В процессе эксперимента газ подается непрерывно. Одновременно непрерывно удаляются подаваемый газ и продукты сгорания через специальное сопло-штуцер, что позволяет поддерживать постоянное давление в установке. Если объем установки велик, то газоприток от сгорания образца мал по сравнению с массой инертного газа, находящегося в установке. В этом случае не требуется сопло-штуцер. Правда, нужно иметь в виду, что произойдет задымление внутреннего объема продуктами сгорания топлива и будет невозможно использовать оптические методы экспериментального исследования. Таким образом, в УПД топливо горит в среде инертного газа при постоянном давлении.

В установках постоянного объема (УПО) топливо горит в среде собственных продуктов сгорания, как и в двигателе. Давление в установке не остается постоянным, а непрерывно повышается по мере сгорания образца. Внутренний объем установки замкнутый. Он должен быть малым по величине, чтобы обеспечить реализацию высокого давления. Следовательно, в УПО горение топлива происходит при



переменном давлении в среде собственных продуктов сгорания.

Рис. 6. Установка постоянного давления: 1 – корпус; 2 – верхняя крышка; 3 – нижняя крышка; 4 – образец топлива; 5 – воспламенитель; 6 – державка образца; 7 – оптические окна; 8 – линия воспламенения; 9 – отверстия для подачи азота

В обоих типах установок используются небольшие образцы цилиндрической или прямоугольной формы. Их максимальные размеры: длина не более 40 мм, поперечные размеры не более 20 мм. Образцы горят по одной торцевой поверхности, а по боковой поверхности и второму торцу покрыты бронирующим составом, предохраняющим эти поверхности от горения. Образцы закрепляются в специальной державке, расположенной в нижней части установки.

Воспламенительное устройство, в большинстве случаев, представляет собой пластинку топлива малой толщины, на которую намотана тонкая проволочная спираль из нихрома. При подаче электрического сигнала на воспламенение спираль раскаляется и поджигает топливную пластинку. Она приклеена к горящему торцу образца и обеспечивает одновременность воспламенения всей его поверхности. Для измерения скорости горения топлива в модельных установках могут использоваться следующие методы.

Для реализации *метода перегорающих реперов* в образец заделывают тонкие (толщиной 0,1...0,2 мм) медные проволочки – реперы P_1 и P_2 (рис. 7). Каждый из реперов включен в свою электрическую цепь, питаемую напряжением 12 В. При подходе фронта горения реперы поочередно перегорают, что фиксируется на устройстве регистрации. В момент перегорания репера нарушается целостность цепи и исчезает регистрируемый электрический сигнал. Если одновременно фиксировать время, например, от кварцевого генератора, то нетрудно определить время между моментами перегорания реперов Δt . Знание точного расстояния между реперами h , которое измеряется в процессе изготовления образца, дает возможность рассчитать скорость горения: $u_T = h/\Delta t$.

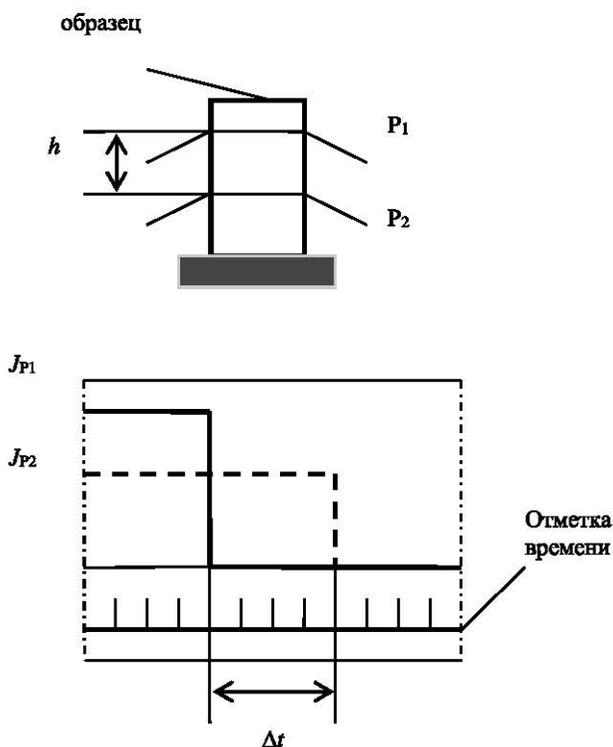


Рис. 7. Метод перегорающих реперов

Следует иметь в виду, что значение скорости является средней в интервале времени Δt . Степень осреднения зависит от величины базы h . Уменьшая базу и используя несколько реперов, можно определить изменение скорости во времени, т.е. измерить нестационарную скорость горения.

Обычно применяют следующую технологию заделки реперов. Образец разрезают вдоль на две половинки. На одну из них укладывают реперы и фиксируют расстояния между ними. Затем обе половинки склеивают для смесевых топлив каучуком или смолой. Для двухосновных топлив склеиваемые поверхности размягчают растворителем (ацетоном), прижимают друг к другу с некоторой нагрузкой и выдерживают определенное время до испарения растворителя.

Достоинства метода:

- 1) простота технической реализации;
- 2) малая номенклатура и исключительная простота измерительного оборудования;
- 3) возможность измерения переменной скорости.

Недостатки метода:

1) горение топлива происходит не в атмосфере продуктов сгорания топлива, а в среде инертного холодного газа. Это может сказаться на скорости горения пограничных слоев топлива из-за их охлаждения внешней средой;

2) контактный метод. Заделка реперов в образец может оказать влияние на процесс горения топлива в зоне заделки;

3) трудность обеспечения параллельности заделки реперов относительно друг друга дает ошибку в определении величины базы между реперами. По этой же причине невозможно с высокой точностью установить время между перегоранием соседних реперов;

4) недостаточная точность определения скорости;

5) измерение скорости в эксперименте возможно только при одном давлении. Для получения закона скорости требуется проведение серии экспериментов.

По исполнению *метод термопар* близок к предыдущему. Он также относится к контактным методам, но вместо реперов в образец заделываются термопары (рис. 8). При прохождении тепловой волны во время горения образца фиксируется ЭДС каждой термопары. Это позволяет получить зависимости температуры от времени (рис. 8). Если измерить базу между спаями термопар и по температурным кривым определить время прохождения тепловой волны между ними, то можно рассчитать среднюю для выбранной базы скорость. За тепловую волну следует принимать волну с температурой, не превыша-

ющей температуру поверхности горящего топлива. Обычно в качестве этой базовой принимают температуру в пределах 600...700 К.

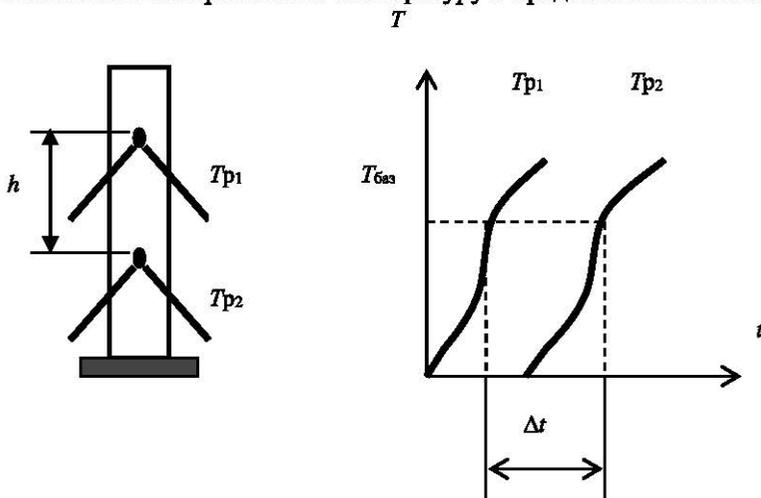


Рис. 8. Метод термопар

Для снижения влияния термопар на процесс горения топлива, и следовательно, для уменьшения ошибки измерения в методе используются микротермопары. Толщина их спая не должна превышать $20 \cdot 10^{-6}$ м. Технология изготовления образца и заделки термопар практически не отличается от технологии, применяемой для образцов с реперами.

Достоинства и недостатки данного метода сходны с методом с использованием реперов. Некоторое преимущество термопарного метода обусловлено исключением погрешности, связанной с непараллельностью заделки реперов.

Теневого оптического метод во многом схож с методом фоторегистрации в модельном двигателе. В нем также фиксируется на фотопленке в режиме покадровой съемки или с помощью цифровой фотокамеры граница яркого пламени, т.е. поверхность горения. Метод можно применять только в УПД, так как необходим большой объем установки для размещения оптических окон. Для использования метода в УПД должны быть предусмотрены следующие элементы конструкции. На боковых стенках корпуса установки нужны узлы крепления оптических окон, как правило, резьбовые. Окна устанавливаются на одной оси, одно из них служит для фотографирования, другое для подсветки. Встречная подсветка позволяет получить резкую гра-

ницу поверхности горения. При фотографировании следует исключить задымленность пространства между образцом и окнами. Это обеспечивается продувкой внутренних поверхностей окон газом наддува, что можно осуществить только, располагая штуцеры подачи инертного газа в нижней части корпуса, в районе окон. Для гарантированного исключения задымленности внутреннего объема дополнительно во время эксперимента удаляют продукты сгорания вместе с инертным газом через специальный штуцер в верхней части установки.

Скорость горения, как и в большинстве других методов, определяют по толщине сгоревшего свода за фиксируемый промежуток времени. Время точно устанавливают с помощью специальных счетчиков кадров, имеющихся на кинокамерах. Для толщины сгоревшего свода это не удастся сделать без специальных мер. Если образец топлива жестко закреплен и абсолютно неподвижен, то в кинокамере во время съемки возможны небольшие перемещения рамки кадра во времени, т.е. кадр может непредсказуемо смещаться относительно образца. При определении стационарной скорости горения погрешность от этого незначительна. Но при измерении нестационарных скоростей ошибка может быть существенной. В последнем случае для повышения точности применяют специальные реперы отсчета. Репер неподвижно закрепляют на державке образца, т.е. его положение относительно образца остается постоянным во все время эксперимента. Поэтому можно очень точно фиксировать на фотокадрах положение поверхности горения относительно репера. Характерный вид двух кадров, полученных в некоторые моменты времени t_1 и t_2 , представлен на рис. 9.

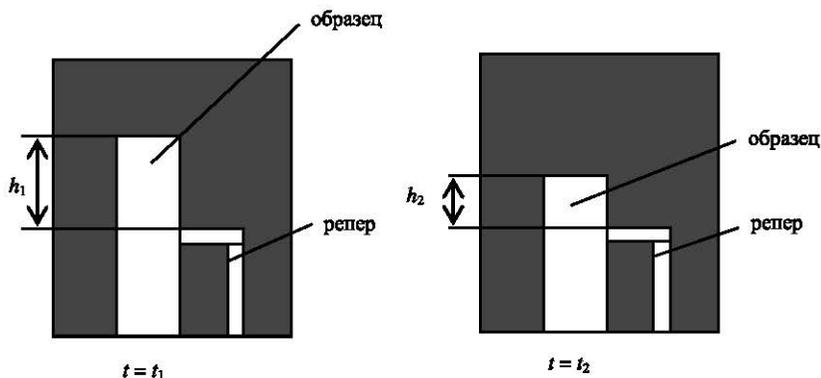


Рис. 9. Теневого оптический метод

На каждом из кадров на фоне сплошной засветки поля кадра, определяемой свечением пламени и подсветкой через окно источником мощного излучения, отчетливо видны границы образца и репера, сквозь которые свет источника не проходит. Отличие в кадрах заключается в положении поверхности горения. В момент времени t_1 она находится на расстоянии h_1 от поверхности репера, а в момент времени t_2 соответственно на расстоянии h_2 . Разность этих величин и является толщиной сгоревшего свода за рассматриваемый промежуток времени.

Достоинства метода:

- 1) бесконтактный метод; отсутствие влияния на процесс горения топлива;
- 2) возможность определения как стационарных, так и нестационарных скоростей;
- 3) возможность совмещения измерения скорости горения с определением других характеристик процесса горения (например, измерение температуры по высоте пламени с помощью оптических методов).

Недостатки метода:

- 1) усложнение конструкции УПД;
- 2) сложность обеспечения прозрачности внутреннего объема и окон;
- 3) сложность системы регистрации и последующей обработки результатов;
- 4) в одном эксперименте измерения ведутся по давлению при неизменных внешних условиях, как и во всех методах, использующих УПД.

Определение закона скорости горения в установке постоянно-го объёма. Определение закона скорости горения, т.е. зависимости скорости от давления, в УПД требует проведения серии экспериментов, в каждом из которых устанавливается своё давление. В УПО этот закон можно с высокой точностью установить в одном эксперименте.

Образец топлива сгорает в замкнутом объёме. Объём установки невелик, поэтому по мере сгорания образца повышается давление в камере установки. Изменение давления фиксируется датчиком. Горение образца происходит при переменном давлении, следовательно, и скорость горения будет переменной. Рассмотрим характер изменения давления в этих условиях [6].

Введем следующие обозначения: V_0 – полный внутренний объём установки; m_0 – полная масса топливного образца; m_{cr} – масса сгоревшего топлива в данный момент времени; ρ_T, R_T, T_T – соответственно плотность топлива, газовая постоянная и температура продуктов сгорания.

Давление газа в любом замкнутом объёме V можно выразить через параметры газа и его массу m_T , с учетом уравнения состояния идеального газа как $p = m_T R_T T_T / V$. В УПО во времени увеличивается масса газа за счет поступления продуктов сгорания от горящего топлива и увеличивается внутренний объём по мере сгорания образца. При малом внутреннем объеме установки небольшой объем сгорания образца заметно сказывается на уровне давления. Объём будет изменяться в соответствии с выражением $V = V_0 - m_0 / \rho_T (1 - m_{cr} / m_0)$. С учетом этого давление в любой момент времени

$$p = \frac{R_T T_T m_{cr}}{V_0 - \frac{m_0}{\rho_T} (1 - m_{cr} / m_0)} . \quad (7)$$

Уравнение (7) позволяет вычислить сгоревшую массу топлива к моменту достижения конкретного давления p :

$$m_{cr} = \frac{V_0 - m_0 / \rho_T}{R_T T_T / p - 1 / \rho_T} . \quad (8)$$

В эксперименте фиксируется изменение давления в установке во времени (рис. 10). По этому графику можно определить давление в любой момент времени или изменение давления $\Delta p_i = p_{i+1} - p_i$ за любой малый промежуток времени $\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$. Если использовать выражение (8), то несложно рассчитать массу топлива $\Delta m_i = m_{i+1} - m_i$, сгоревшую за этот промежуток времени. Отношение массы сгоревшего топлива к времени его сгорания есть секундный массовый расход, который можно выразить через плотность топлива, его скорость горения и площадь горения образца: $\Delta m_{cr} / \Delta t = \dot{M} = \rho_T S_z u_T$.

Из последнего выражения определяется скорость горения, средняя за промежуток времени Δt .

Таким образом, измерив в эксперименте давление и время и рас-

считав по приведенным выше зависимостям скорость горения, можно построить результирующую зависимость скорости от давления (рис. 10). Аппроксимируя эту зависимость степенной функцией, находят постоянные в законе скорости горения: $u_T = U_1 p^\nu$.

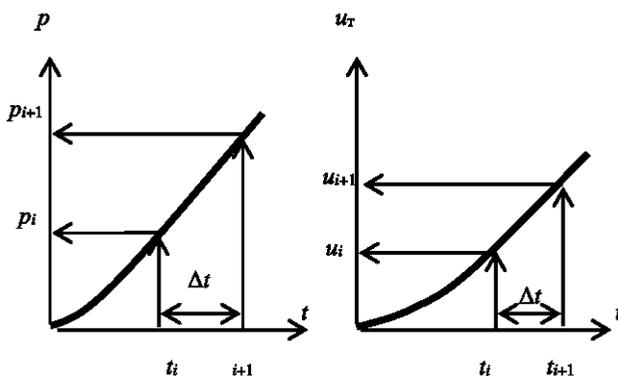


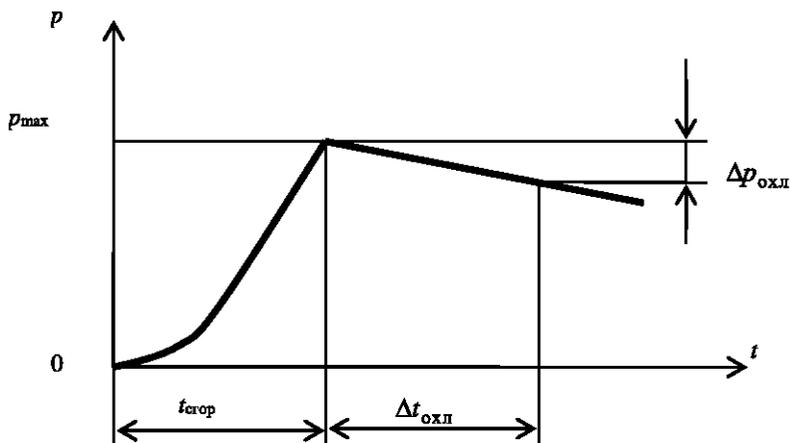
Рис. 10. Измерение скорости горения в УПО

Точность определения зависимости скорости горения от давления обусловлена величиной выбираемого интервала времени. Чем меньше этот интервал, тем меньше осреднение измеряемой скорости и тем точнее получаемый закон скорости горения. Точность метода также зависит от величины возможных методических ошибок.

1. Неточность знания температуры газа, заполняющий внутренний объём. В процессе эксперимента температура будет снижаться за счет утечки тепла в стенки камеры и последующего излучения в окружающую среду. Это приведет к снижению давления в камере. Существует несколько способов уменьшения этой погрешности. Один из них заключается в уменьшении отвода тепла за счет нанесения на внутренние поверхности стенок теплоизолирующего покрытия, что позволяет уменьшать падение температуры.

Можно внести поправку в расчетные зависимости, определив закон падения температуры. Поправка рассчитывается на основании измерения давления во времени после полного сгорания образца. Вид графика такого измерения представлен на рис. 11. Во время горения образца давление в камере непрерывно повышается, достигая максимального значения $p_{\text{омах}}$ в момент окончания горения топлива. Далее

давление будет уменьшаться за счет охлаждения газа в камере. В предположении, что характер падения температуры в этот период не отличается от падения во время горения образца, можно определить градиент $\Delta p_{\text{охл}}/\Delta t_{\text{охл}}$ и внести поправку в величину давления в расчетные зависимости и графики. Наиболее точно учесть падение температуры удастся путем её непосредственного измерения в ходе эксперимента, например с помощью термопары. Такое измерение да-



ет возможность знать реальную температуру газа в любой момент времени и вводить её в расчетные зависимости.

Рис. 11. Определение тепловых потерь

2. Еще одна методическая ошибка связана с наличием конденсированных частиц в продуктах сгорания твердого ракетного топлива. В рассмотренной методике предполагается, что вся масса сгоревшего топлива превращается в газообразные продукты. В реальном случае в газообразных продуктах сгорания присутствуют конденсированные частицы, масса которых не создает давления. Во всех топливах ими являются частицы сажи. Размер этих частиц чрезвычайно мал (несколько микрометров), поэтому отсутствует существенное влияние их на уровень давления. При горении высокоэнергетичных топлив, в составе которых присутствует металлическое горючее, в продуктах сгорания присутствует достаточно большое количество довольно крупных частиц оксида металла. Массовая доля частиц может достигать 20%. При определении скорости горения по рассматриваемой мето-

дике необходимо путем термодинамического расчета определять массовую долю конденсированных частиц и вносить соответствующую поправку в расчетные зависимости.

Достоинство метода:

- 1) метод неконтактный, т.е. отсутствует вмешательство в процесс горения;
- 2) горение топлива происходит практически в собственных продуктах сгорания;
- 3) возможно измерение нестационарной скорости горения;
- 4) возможно в одном эксперименте получить закон скорости горения;
- 5) простота конструктивного обеспечения по сравнению с методами, реализуемыми в УПД.

Недостаток метода – сложность оценки методических погрешностей. При экспериментальном определении реальной температуры газа усложняется комплекс измерительного оборудования.

Ультразвуковой метод основан на зондировании образца топлива или топливного заряда звуковыми импульсами высокой частоты [7]. Звуковые частоты более 20 кГц, называемые ультразвуковыми, обладают свойствами, которые позволяют использовать их для диагностирования материалов. Ультразвуковые волны имеют малую длину волны, поэтому, как и световые волны, могут образовывать строго направленные пучки. Для них также справедливы законы отражения. Если направить такой пучок с интенсивностью J_0 вдоль образца

топлива к поверхности его горения, то он после отражения от границы «топливо–газ», т.е. отражения от поверхности горения, вернется в виде отраженного пучка с меньшей интенсивностью $J_{отр}$ (рис. 12).

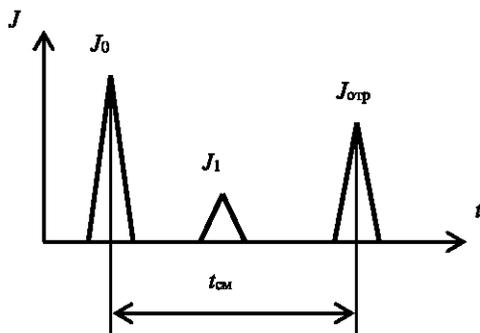


Рис. 12. Регистрируемые импульсы ультразвукового излучения

Время между подачей зондирующего импульса и возвращением отраженного импульса называется временем смещения $t_{см}$. Это время будет зависеть от толщины материала, т.е. от высоты образца, и от скорости распространения волны в данном топливе. Зная скорость распространения волны c и фиксируя время смещения, можно определить высоту образца $h = t_{см} \cdot c/2$.

Методика может использоваться как в модельных двигателях, так и в УПД и УПО. В любом случае топливо горит при повышенном давлении и внутренний объем необходимо герметизировать. Для обеспечения прочности стенки камеры обычно изготавливаются из стали. Источник ультразвуковых импульсов располагается с внешней стороны камеры. При такой схеме ультразвуковой поток будет проходить сначала через стальную стенку, а уже затем через топливный образец. Эти материалы сильно отличаются по акустическим свойствам, которые характеризуются плотностью материала и скоростью распространения ультразвуковой волны в нем. Например, у стали скорость распространения волны ~ 6000 м/с, а у резин, которые близки по акустическим характеристикам к топливам, её величина не превышает 2000 м/с [8]. Из-за этого при прохождении их границы возникнет дополнительный отраженный импульс, интенсивность которого J_1 будет соизмерима по величине с интенсивностью отраженного импульса (рис. 12).

Для четкой идентификации основного и отраженного от поверхности горения сигналов необходима малая величина сигнала от границы стенки между камерой и образцом топлива. Это можно обеспечить, введя специальный буферный материал между источником ультразвуковых импульсов и образцом. Материал должен обладать акустическими свойствами, близкими к свойствам топлива, нормально передавать звуковые импульсы к образцу и выполнять функцию герметизации внутреннего объема камеры и защиты источника импульсов от воздействия продуктов сгорания. Обычно в качестве буферного материала используют жесткую резину, отвечающую этим требованиям. Вкладыш конической формы (рис. 13) под действием давления деформируется и герметизирует внутренний объем установки.

Источником ультразвуковой волны является ультразвуковой преобразователь (ПР). Возможно использование магнитострикционных и пьезоэлектрических ПР [9]. Работа первых основана на магнитострикционном эффекте, при котором ферромагнитное тело под воздействием магнитного поля деформируется, т.е. изменяется его геометрический размер, например, длина. Питание ПР осуществляется от

высокочастотного генератора, поэтому в соответствии с частотой электрического тока изменяются магнитное поле возбуждающей электромагнитной катушки и деформация ферромагнитного тела. Результат – образование высокочастотных колебаний чувствительного элемента ПР, которые передаются буферному материалу и образцу топлива, т.е. возникновение ультразвуковой волны.

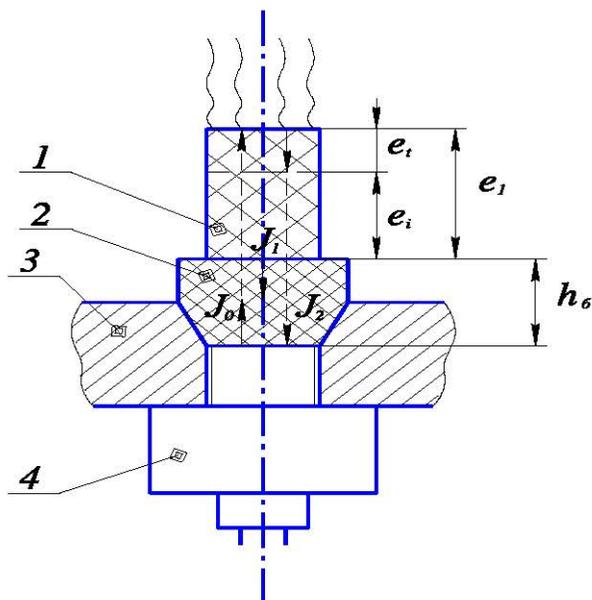


Рис. 13. Ультразвуковой метод: 1 – образец топлива; 2 – буфер; 3 – стенка; 4 – ультразвуковой ПР

Конструктивно магнестрикционные ПР выполняют в виде сердечника из тонких пластин ферромагнитного материала, на котором размещена обмотка для возбуждения в нем высокочастотных колебаний.

Достоинством данных ПР по сравнению с пьезоэлектрическими является возможность обеспечения большой мощности ультразвуковых колебаний. Однако в них при электромагнитном и магнито механическом преобразовании энергии часть её теряется, выделяясь в виде тепла. Вследствие этого происходит мощный нагрев ПР. Для нормальной работы ПР требуется водяное охлаждение, что существенно усложняет его конструкцию.

В пьезоэлектрических ПР для создания ультразвуковой волны

используется обратный пьезоэлектрический эффект, при котором под действием внешнего электрического поля деформируется пьезокристалл. Питание ПР также осуществляется от высокочастотного генератора. Для чувствительного элемента обычно применяют пьезокерамику (титанат бария, цирконат-титанат свинца), так как пьезокристаллы дороги и у них более низкий пьезоэффект. Пьезокерамика, помимо высокого пьезоэффекта, имеет еще ряд достоинств. Она прочна, дешева из-за простой технологии изготовления и позволяет изготавливать чувствительные элементы любой формы (прямоугольные пластины, кольца, диски и т.д.). Пьезокерамика обладает небольшим входным сопротивлением, что определяет небольшие электрические напряжения, необходимые для её возбуждения. Наконец, пьезокерамика выдерживает нагрев до 200 °С.

Регистрация отраженных импульсов производится тем же чувствительным элементом, который посылает зондирующие сигналы. В магнитострикционном ПР силовое воздействие отраженного сигнала меняет намагниченность элемента из-за его деформации, что приводит к изменению тока в возбуждающей катушке. Это изменение фиксируется в ультразвуковом генераторе, специальное электронное устройство которого сравнивает основной и отраженный сигналы и определяет время смещения. В пьезоэлектрическом ПР силовое воздействие отраженного сигнала деформирует чувствительный элемент, вызывая возникновение зарядов на поверхности. Определение времени смещения также происходит в ультразвуковом генераторе.

Основные элементы принципиальной блок-схемы измерения и регистрации с помощью персонального компьютера при использовании данного метода (рис. 14) следующие. Ультразвуковой преобразователь (УЗП) излучает ультразвуковую волну и воспринимает отраженную волну. Ультразвуковой генератор (УЗГ) является источником колебаний электрического тока высокой частоты, которые поступают в УЗП и последовательно преобразуются в механические колебания, а затем в ультразвуковую волну. Одновременно УЗГ воспринимает электрические сигналы от УЗП, вырабатываемые под воздействием отраженных сигналов, и определяет время смещения. Частотный сигнал изменения времени смещения во времени из УЗГ усиливается в усилителе (У) и поступает в согласующее устройство (ПСУ). В ПСУ происходит согласование разрядности кода измеренного сигнала и персонального компьютера (ПК). Опрос ультразвуковой системы измерения производится по команде управляющей программы ПК с частотой более 20 кГц. В состав системы входят источник питания

(ИП) и ПК.

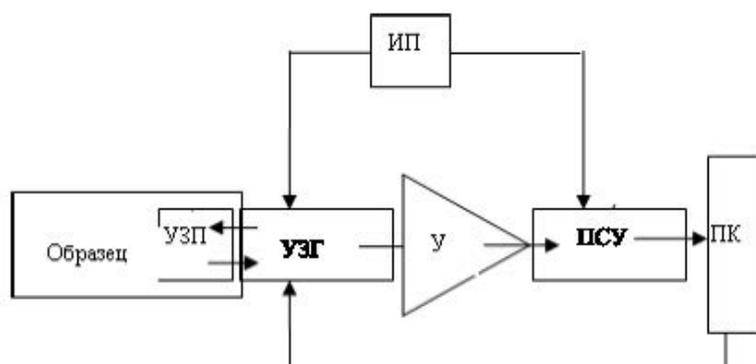


Рис. 14. Блок-схема измерения ультразвуковым методом

Таким образом, методика основана на измерении времени смещения (времени между подачей зондирующего импульса и приходом отраженного от поверхности горения импульса) и анализе его изменения во время горения образца топлива. Результатом является зависимость $t_{\text{см}} = f(t)$ (рис. 15), которая позволяет для любого времени t рассчитать текущую высоту образца топлива: $h_t = c \cdot t_{\text{см}}$ и построить график $h_t(t)$. На основании этой зависимости и рассчитывают скорость горения как отношение изменения высоты образца к фиксируемому интервалу времени: $u_{\text{г}} = \Delta h_t / \Delta t_t$. Значение скорости будет средней величиной за интервал времени Δt_t . Задаваясь малыми интервалами времени, можно определить нестационарную скорость горения.

При практической реализации метода необходимо учитывать следующее. Акустическое поле, создаваемое пьезоэлектрическим ПР, состоит из двух зон. В ближней зоне, непосредственно примыкающей к ПР, амплитуда акустических колебаний максимальна. Её длина равна $h_1 = D^2 f / 4c$, где D – диаметр излучателя, f – частота излучения, c – скорость звука в топливе. Во второй, дальней, зоне $h > h_1$, амплитуда начинает достаточно быстро падать. Выгодно располагать образец в дальней зоне. В этом случае отраженный от поверхности горения сигнал будет иметь малую амплитуду, его легко отличить от зондирующего сигнала с большой амплитудой.

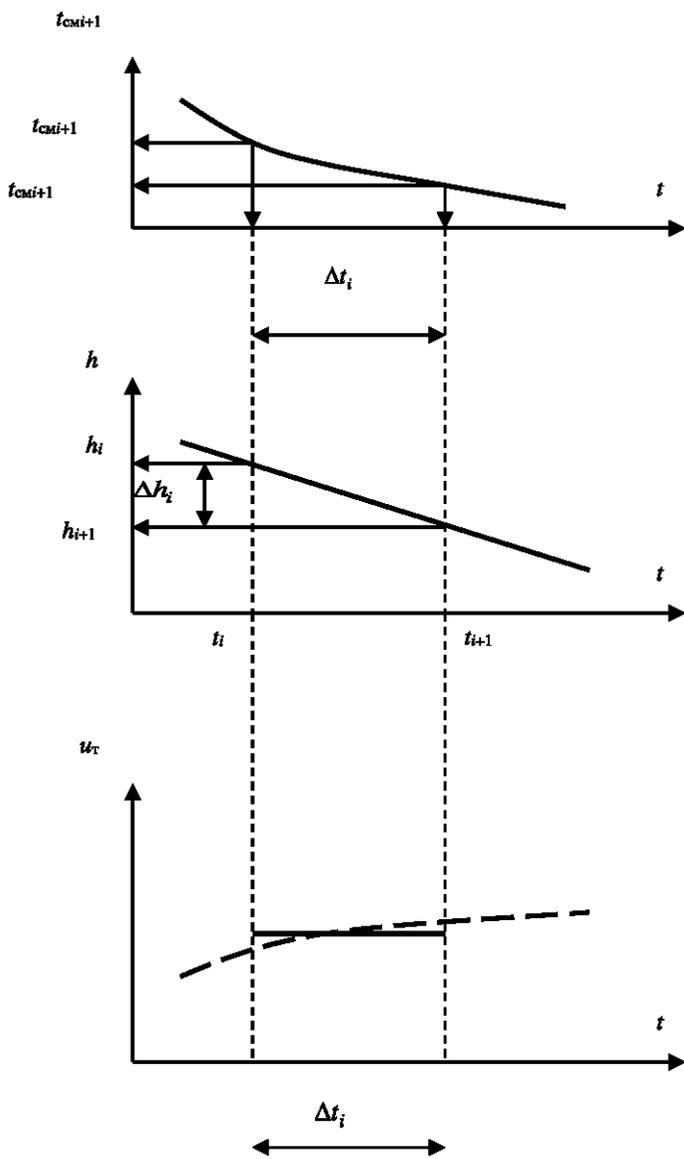


Рис. 15. Обработка эксперимента

Ультразвуковое излучение происходит в расширяющемся луче, угол расширения которого равен $\sin(\alpha/2) = 0,514c/fD$. Размер поверхности горения образца, от которой отражаются волны, необходимо выбирать с учетом этого угла расширения. Целесообразно, чтобы поперечный размер луча всегда был меньше размера поверхности образца. В этом случае исключаются возможные краевые эффекты на границе образца и окружающей среды, вследствие которых может изменяться скорость горения.

Рассмотрим конкретный пример. Предположим, что в качестве ПР используется пьезоэлектрический преобразователь марки П111-1,25 со следующими характеристиками:

- эффективная частота – $1,25 \pm 0,07$ МГц;
- размер пьезоэлемента – диаметр 20 мм;
- рабочая поверхность – диаметр 22 мм;
- диапазон контроля – 15...180 мм;
- габариты – диаметр 28 мм, высота 42 мм.

Для этого ПР и скорости звука, равной 1800 м/с, длина ближней зоны акустического поля оказывается равной 24,4 мм. Значит, толщина буферного материала должна быть не менее 25 мм. Расчетный угол расширения луча равен 0,0336 радиан ($4,07^\circ$). При длине образца 40 мм, что определяет общую длину пути луча до поверхности горения 65 мм, отраженный сигнал будет поступать от площади поверхности, описываемой окружностью диаметром примерно 3 мм. Следовательно, использование образца диаметром 10 мм гарантирует исключение краевых эффектов.

Достоинства метода:

- 1) отсутствует вмешательство в процесс горения;
- 2) измерение стационарных и нестационарных скоростей;
- 3) возможно применять в условиях модельных установок для топливных образцов и в двигателях с торцевыми зарядами.

Недостатки метода:

- 1) достаточная сложность измерительного оборудования;
- 2) необходимость предварительного экспериментального исследования для определения скоростей распространения звуковой волны в топливе и буферном материале;
- 3) зависимость скорости распространения волны от температуры.

Библиографический список

1. *Испытания ЖРД.* / Под ред. В.З. Левина. М.: Машиностроение, 1981.
2. *Белов В.П.* Внутрикамерные процессы в ракетных двигателях на твердом топливе: учебное пособие; Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 2018.
3. *Ерохин Б.Т.* Теория внутрикамерных процессов проектирование РДТТ: учебник. М.: Машиностроение, 1991.
4. *Белов В.П.* Проектирование элементов конструкции ракетных двигателей на твердом топливе: учебное пособие; Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 2011.
5. *Тимнат И.* Ракетные двигатели на химическом топливе. М: Мир, 1990.
6. *Белов В.П.* Скорость горения твердого ракетного топлива и методы её экспериментального определения: учебное пособие; Балт. гос. техн. ун-т. СПб, 2008.
7. *Коти Ж.* Ультразвуковой метод определения скорости горения: ошибки, шумы и чувствительность // Физика горения и взрыва, 2001, № 1.
8. *Неразрушающий контроль и диагностика: справочник* / под ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 2003.
9. *Датчики теплофизических и механических параметров справочник: в 3-х тт.* / Под ред. Ю.Н. Коптева. М.: Радиотехника, 2000.