

ИМПУЛЬСНЫЕ ЖИДКОСТНЫЕ ГАЗОГЕНЕРАТОРЫ ДЛЯ ДВИГАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Дубинкин Ю. М., Лыкин А.Ю., Нигодюк В.Е.

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

На протяжении нескольких лет в ОНИЛ-2 СГАУ занимались проблемой снижения массы двигательной установки (ДУ) с жидкостными ракетными двигателями малой тяги (ЖРДМТ). Одним из самых перспективных направлений мы считаем совершенствование системы наддува топливных баков ДУ.

В настоящее время на ДУ с ЖРДМТ используют вытеснительную систему наддува топливных баков на холодном газе. Чаще всего в качестве рабочего тела используют азот или гелий. Пневмогидравлическая схема (ПГС) вытеснительной системы наддува топливных баков на холодных газах представлена на рис. 1а. Основными элементами приведенной системы являются: баллон со сжатым газом 1, в котором хранится рабочее тело наддува, редуктор давления 4, обеспечивающий требуемый уровень давления в топливных баках, и пироклапан 3, обеспечивающий запуск системы наддува.

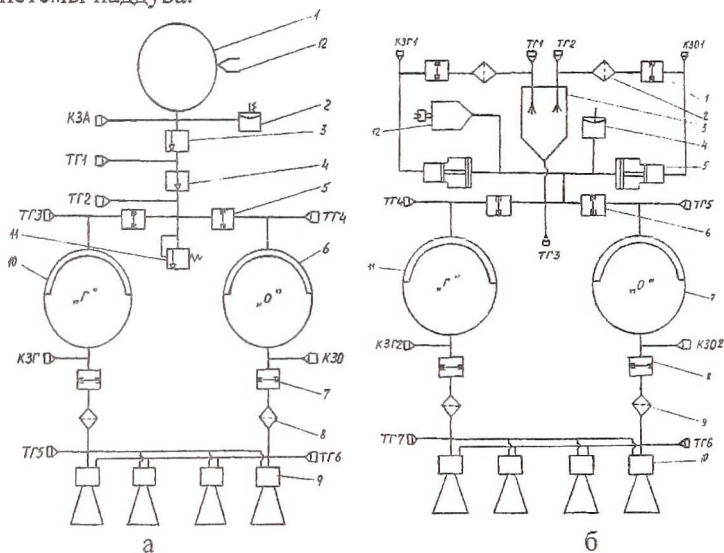


Рис. 1. ПГС вытеснительной системы наддува на холодном газе (а);
ПГС газогенераторной системы наддува (б).

Основным недостатком данной системой наддува является наличие на борту КЛА баллона со сжатым газом, давление в котором превышает номинальное баке в 25...30 раз. В связи с этим стенки бака имеют значи-

тельную толщину и как следствие массу. Значительную массу также имеют редуктор давления и пироклапан. Кроме того, на данную систему накладываются определённые требования по температуре хранения газа в баллоне.

Для снижения массы ДУ и повышения надёжности её хранения и эксплуатации мы предлагаем использовать для наддува топливных баков горячие газы.

Остановимся на специфике работы ДУ с ЖРДМТ, которая накладывает определённые требования на систему наддува топливных баков. Следует отметить, что в ДУ с ЖРДМТ из одного бака питаются двигатели различной размерности, работающие в импульсном режиме с временем включения от 20 до 100 мс и различными паузами между ними. Соответственно, и давление в баках изменяется скачкообразно. В связи с этим и генератор газа наддува должен работать в импульсном режиме и включаться для восполнения падения давления в баке из-за выработки топлива ЖРДМТ. Очевидно, необходимо различное количество включений в серии и различное время пауз между ними.

Рассматривая различные схемы систем наддува топливных баков ДУ с ЖРДМТ на горячих газах, мы пришли к выводу, что наиболее эффективно перечисленным требованиям удовлетворяют газогенераторные системы наддува топливных баков. В таких вытеснительных системах наддува рабочее тело вырабатывается в газогенераторах (ГГ), работающих на штатных компонентах ДУ (чаще всего горючее типа НДМГ и азотный тетраоксид в качестве окислителя). При этом рассматривались варианты как двух-, так и однокомпонентных ГГ.

На рис. 1,б представлена ПГС газогенераторной системы наддува топливных баков ДУ с двухкомпонентным ГГ, генерирующим рабочее тело наддува. Основными элементами системы являются: газогенератор (3), вырабатывающий рабочее тело наддува; мультипликаторы (5), в которых соответственно хранятся горючее и окислитель, с помощью мультипликаторов компоненты подаются в ГГ; запускающий ГГ (12), обеспечивающий начальный наддув системы; реле давления (4), с помощью которого осуществляется управление включениями ГГ.

При разработке двухкомпонентных ГГ мы рассматривали два типа: окислительные – с $\alpha_{ок} > 1.2$ и восстановительные с $\alpha_{ок} < 0.3$. Анализируя состав продуктов газогенерации в этих двух типах ГГ, из соображений безопасности мы остановились на восстановительном типе ГГ.

Конструкция двух из разработанных двухкомпонентных ГГ представлена на рис. 2. ГГ состоит из головки с инжекторным элементом и камеры сгорания (разложения). Как показали эксперименты, в ГГ форма и размеры камеры разложения не имеют такого существенного значения как в ЖРДМТ. Существенную роль в процессе наиболее качественного

разложения играет инжекторное устройство. В наших конструкциях в качестве инжекторного устройства использовался клиновидный смесительный элемент, представляющий собой кольцевую коническую поверхность, на которую из струйных форсунок подаются горючее и окислитель.

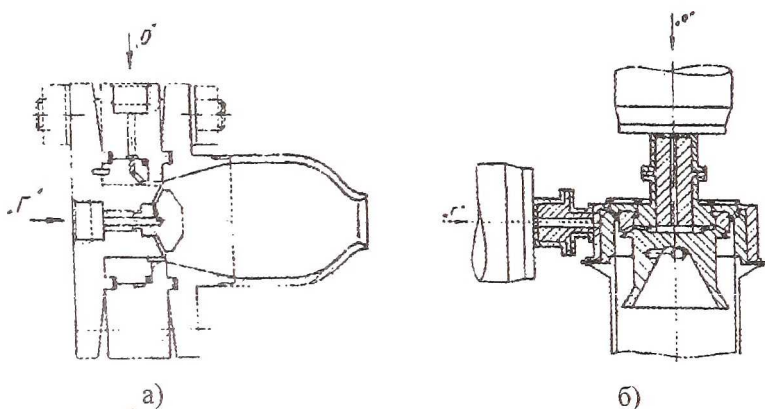


Рис. 2 Конструкция двухкомпонентного импульсного газогенератора (а); газогенератор с предкамерой (б).

Взаимодействуя на кромке клина плёнки горючего и окислителя перемешиваются, образуя парогаз, который затем, сгорая, выделяет теплоту, которая идёт на разложения избыточного, непрореагировавшего компонента.

Достоинствами такого инжекторного элемента являются: простота изготовления, создание равномерного фронта пламени по сечению камеры и возможность обеспечивать любое направление суммарной плёнки.

Пытаясь обеспечить максимальное разложение избыточного количества горючего, мы рассматривали различные схемы организации процесса в камере разложения ГГ. Меняя направление подачи суммарной пленки, возможна организация пристеночного горения и горения на оси камеры. При пристеночном горении суммарная плёнка подаётся на стенку камеры, обеспечивая ей дополнительное охлаждение. При организации горения на оси камеры суммарная плёнка направляется вдоль оси камеры. Первый способ более предпочтительный для организации горения в ЖРДМТ, где есть необходимость охлаждения стенки камеры ввиду высоких температур. В ГГ из-за избытка одного из компонентов всю теплоту, выделившуюся в процессе горения, необходимо направить на разложение не участвующей в горении части горючего. В связи с этим, а также из-за

менее напряжённого теплового состояния камеры в ГГ целесообразно организовывать горение по оси камеры.

Для обеспечения более полного преобразования топлива нами рассматривать ГГ с предкамерами (рис. 2б). Предкамерой является полость, в которой происходит взаимодействие компонентов, их перемешивание, образование парогаса и на выходе из предкамеры – горение. Нами найдено эмпирическое соотношение для объёма предкамеры, при котором не будет происходить горение.

Окончательная доводка и выбор конструкции ГГ возможны при экспериментальных испытаниях.

Достоинством двухкомпонентного ГГ является его практически неограниченное время работы при различных частотах включений. Но его недостатком является то, что от 20% до 50% продуктов газогенерации составляет жидкая фаза. Как показали эксперименты, такого недостатка лишён однокомпонентный ГГ на штатном горючем типа НДМГ.

Однако имеется ряд серьезных научных и технических проблем, осложняющих задачу создания газогенераторов для систем наддува. Во-первых, горючее типа НДМГ начинает сколько-нибудь активно экзотермически разлагаться при температурах превышающих 750 К, во-вторых, работа такого газогенератора с целью поддержания заданного уровня давления в баках, учитывая особенности ДУ, должна иметь импульсный характер при времени отдельного включения 20...100 мс с паузами различной продолжительности, т.е. необходимо обеспечить многократный запуск газогенератора, при этом количество включений в зависимости от расхода топлива в двигателе и его общего запаса на борту аппарата может превышать 1000.

С учетом высокого уровня температуры разложения горючих, необходимости многократных запусков газогенератора реально организация процессов газогенерации только при наличии в камере газогенератора достаточно мощного источника энергии, обеспечивающего разложение вновь поступающей порции горючего при каждом включении газогенератора.

Анализ различных типов воспламеняющих устройств (дежурный факел, электроискровой и т.д.) показал, что для организации реакции разложения горючих типа НДМГ целесообразно применять горячие поверхности. При этом возможно организовать самоподдерживающийся процесс так, чтобы поверхность восполняла потери теплоты за счёт аккумуляции теплоты, выделяющейся во время экзотермической реакции разложения горючего.

В качестве поверхности, на которой происходит реакция разложения горючего, наиболее целесообразно использовать засыпку из сферических гранул. Такой способ имеет ряд преимуществ перед другими схемами организации реакции разложения на горячих поверхностях. Гранулированная засыпка имеет разветвленную поверхность контакта с горючим, легко размещается и закрепляется внутри цилиндрической камеры сгорания ГГ.

Нами были сформулированы основные требования к материалу гранул сферической засыпки. В число требований входят:

- высокая температура плавления конечных продуктов, исключающая термическое разрушение засыпки во время работы ГГ;
- химическая и эрозионная стойкость к воздействию продуктов сгорания;
минимальное газовыделение при нагревании и способность сохранять свою форму и размеры;
- возможность быстрого разогрева при запуске ГГ до температуры, требуемой для разложения горючего.

В связи с последним требованием мы остановились на химических источниках тепла, в которых возможно протекание экзотермических реакций безгазового горения металлов.

Рассматривались реакции двух типов: реакции металлотермического восстановления окислов (горения термитов) и реакции самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Опираясь на теплофизические свойства материалов, мы остановились на реакции горения термитов.

В ОНИЛ-2 СГАУ было разработано несколько конструкций однокомпонентных импульсных ГГ на горючих типа НДМГ с секундным массовым расходом на непрерывном режиме от 10 до 350 Ус.

Конструкция одного из экспериментальных ГГ представлена на рисунке 3.

Корпус ГГ состоит из трех основных частей: цилиндрического участка 2, нижнего днища 3 и крышки 1. Внутри корпуса помещается теплоизолирующая вставка, предохраняющая конструкцию от перегрева. В нашем случае вставка выполнена разъёмной из частей 5,6 и 7. Гранулированная засыпка 9 укладывается и фиксируется внутри корпуса ГГ с нижнего торца вольфрамовой сеткой 8. Представленный ГГ устанавливался вертикально, поэтому фиксация засыпки с верхнего торца не предусматрива-

лась. Для запуска ГТ и инициализации реакции горения термита внутри засыпки предусмотрены пирозапальные устройства 10.

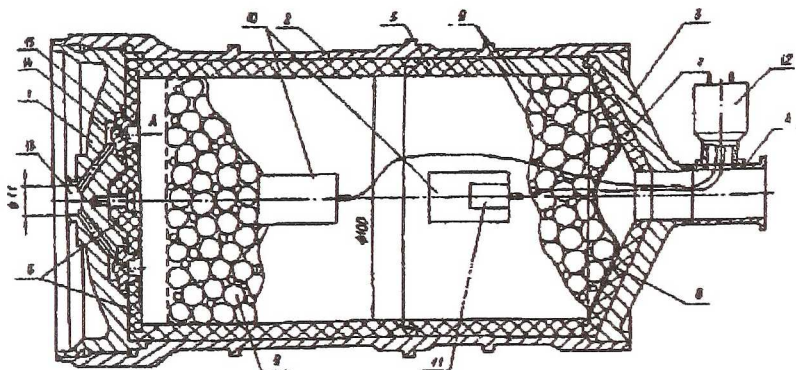


Рис. 3 Конструкция однокомпонентного газогенератора

Подача горючего в камеру сгорания осуществлялась клиновым смесительным элементом. Достоинствами такого типа распыливающего устройства является его простота в изготовлении, получение капель с требуемыми размерами и скоростью, возможность обеспечения равномерного распыла компонента практически по всей площади торцевой поверхности. Чертеж конструкции основной детали клинового смесительного элемента - клина для ГТ с рис. 3 приведен на рис. 4.

Экспериментальное исследование однокомпонентного импульсного ГТ проводилось в ОНИЛ-2 СГАУ на специально разработанной экспериментальной установке.

Результаты испытаний показали достаточно высокую эффективность разложения НДМГ и ММГ в импульсных ГТ рассмотренной схемы и возможность проектирования подобных ГТ с целью разложения необходимой для наддува баков ДУ объема горючего за время работы, определяемое требованиями технического задания.

В качестве примера на рис. 5 представлена зависимость температуры продуктов разложения ММГ на выходе из ГТ $T_{\text{вых}}$ и температура газа в имитаторе полостей наддува баков T_6 при испытаниях одного из опытных ГТ. Время t_0 соответствует подаче напряжения на запальное устройство. Первое включение ГТ произведено на 45 секунде. Общее время функционирования ГТ составило 63 секунды, за этот период было выпол-

нено 250 включений ГГ продолжительностью $\tau_{\text{вкл}} = 0.045 \dots 0.09$ сек. Давление в камере ГГ составило $p_k = 5.5 \pm 0.2$ МПа. Средняя температура продуктов разложения на выходе из ГГ составила ≈ 850 °С. Разница температур $T_{\text{вых.}}$ и $T_{\text{б.}}$, в среднем равнявшаяся 250 °С, объясняется охлаждением газа в имитаторе полостей наддува из-за отсутствия специальных мер теплозащиты стенок бака.

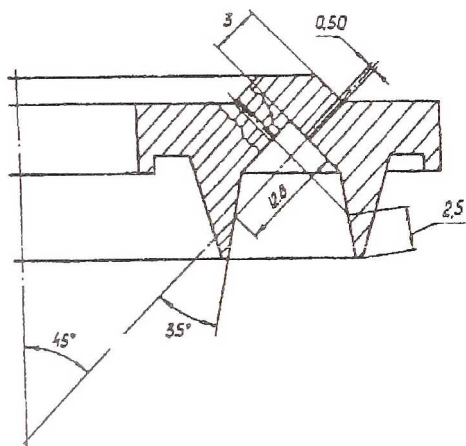


Рис.4. Клин

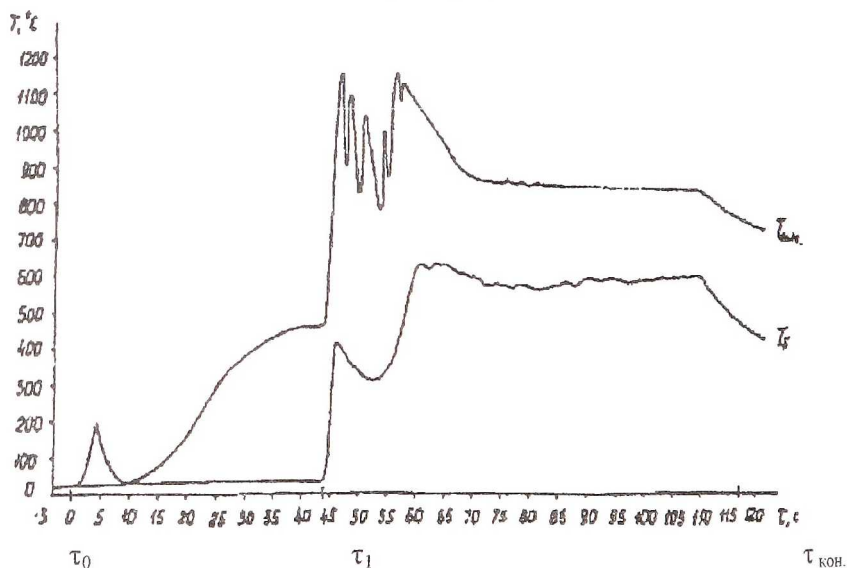


Рис. 5 График распределения температур на выходе из ГГ ($T_{\text{вых.}}$) и в баке ($T_{\text{б.}}$)

В состав продуктов разложения входят водород, азот, метан, аммиак и монометиламин с объёмными долями соответственно 0.16; 0.26; 0.32; 0.12; 0.14. Молекулярная масса продуктов в данном случае составила $\mu_{п.р.} = 19.1 \frac{г}{\text{моль}}$ и, соответственно, удельная газовая постоянная $R_{п.р.} = 435.3 \frac{Дж}{кг \cdot К}$.

Подход к моделированию внутрикамерных процессов основывался на разбиении работы ГТ на различные режимы: запуск, основной режим и останов.

Режим запуска характеризуется инициализацией реакции горения термитов, разогрева гранульной засыпки и постепенным выравниванием температуры по всему объёму камеры.

На основном режиме работы происходит разложение горючего на горячих поверхностях гранул засыпки. Моделирование представляет собой определение давления и температуры гранульной засыпки и соответственно продуктов газогенерации. Модель представляет собой последовательность преобразования горючего: распыл; пролёт капель в газо-вязкой среде камеры сгорания; испарение капель горючего в поровом пространстве засыпки; разложение горючего и движение газо-фазных продуктов разложения и т.д.

Останов характеризуется прекращением подачи горючего и постепенным остыванием гранулированной засыпки.

В цели нашей статьи не входило более детальное рассмотрение модели разложения горючего в ГТ представленного типа, но следует отметить, что они позволяют проектировать однокомпонентные импульсные ГТ для получения рабочего тела наддува топливных баков в широких диапазонах расходов и давлений.