

УДК 629.7.036.5-543

Исследование рабочих процессов в микродвигательных установках

А.В Якутин .

Аннотация

Предложено математическое описание рабочих процессов в жидкостных ракетных микродвигательных установках на однокомпонентном топливе. Это процессы каталитического и термического разложения гидразина, гидро- и газодинамические процессы течения в распределительном блоке, каталитическом реакторе и сопле, процессы теплообмена в камере двигателя, с учетом теплоотвода в стенку корпуса.

Произведен численный анализ рабочих процессов и оценена тяга и удельный импульс микродвигателя. Проведены исследования зависимости распределения температуры потока в каталитическом микрореакторе от температуры его стенок.

Предложенный подход численного исследования рабочих процессов в ракетных микродвигательных установках позволяет сократить время и стоимость их разработки.

Ключевые слова:

микродвигательная установка; наноспутники; математическое моделирование; каталитический реактор; микросопло; разложение гидразина

Введение

Концепция применения малых космических аппаратов в настоящее время стала особенно актуальной из-за стремления минимизировать стоимость жизненного цикла спутников для различных космических миссий путём уменьшения массы и размеров этих аппаратов.

Можно утверждать, что в ближайшей перспективе будут созданы наноспутники с активной системой ориентации. При этом одной из ключевых проблем является создание микродвигателей для управления положением в пространстве и коррекции орбиты таких аппаратов.

Основными областями применения космических аппаратов с микродвигателями являются: управление космическим телескопом, телекоммуникация, навигация, мониторинг ближайшего космического пространства и различных ресурсов Земли, выполнение научных миссий на околоземных орбитах, межпланетные полеты, зондирование космических тел, например, астероидов, инспектирование космических аппаратов, формационные полеты, например, формирование сетки антенны для космического телескопа и многое другое.

Целями настоящей работы являются создание математической модели внутрикамерных рабочих процессов в жидкостных ракетных микродвигателях (микро-ЖРД) применительно к очень малой размерности трактов (в несколько десятков микрометров), а также исследование процессов преобразования монотоплива и течения продуктов разложения в трактах микро-ЖРД для повышения эффективности его характеристик.

В данной работе объектами моделирования являются:

- процессы каталитического и термического разложения гидразина;
- гидро- и газодинамические процессы течения в распределительном блоке, каталитическом реакторе и микросопле;
- процессы теплообмена в камере, с учетом теплоотвода в стенку и во внешнюю среду.

В результате математического исследования решаются задачи по определению тяги и удельного импульса микро-ЖРД в зависимости от конструктивных параметров, свойств катализатора и расхода топлива.

Проблема формирования общей математической модели решается путем создаётся нескольких взаимосвязанных моделей, которые взаимно дополняют друг друга, делая понятной структуризацию всего объекта.

Описание математической модели

Основной особенностью исследуемых двигателей являются их сверхмалые размеры и прямоугольная форма поперечных сечений (двигатель плоский), обусловленная способом изготовления - ионным травлением на кремниевой пластине. Снимок двигателя приведен на рис. 1 [1].

Двигатель работает на однокомпонентном топливе – гидразине. Микродвигатель состоит из следующих основных элементов: распределительный блок, предреакторное пространство, каталитический реактор и сопло. Каталитический реактор представляет собой совокупность отдельно стоящих и равноудаленных друг от друга элементов ромбообразной

(или другой) формы. Элементы, а так же область подложки и боковые стенки реактора, покрываются каталитически активным металлическим сплавом «Shell-405».

При проведении вариантных расчетов принимались следующие размеры: длина ЧИПа - 15 мм, ширина – 10 мм, высота – 1 мм; длина каталитического реактора и сопла - 6,57 мм, ширина среза сопла – 1,27 мм, глубина - 0,15 мм.

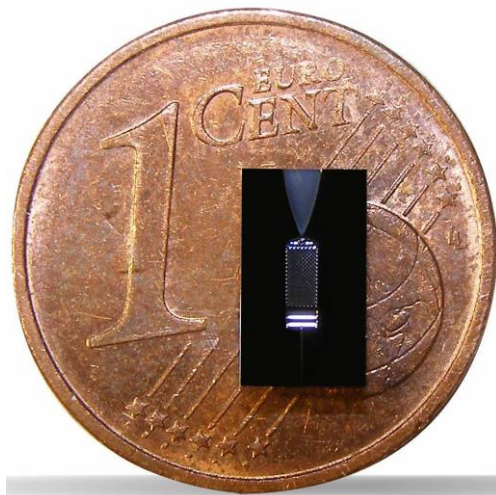


Рис. 1. Снимок микро-ЖРД на фоне 1 цента

Каталитический реактор можно рассматривать в виде совокупности извилистых микроканалов, по которым протекает реагирующая среда. Все каналы сообщаются между собой в ряде точек. Влиянием перетечек между каналами пренебрегаем и считаем, что в отдельно взятом канале осуществляется течение с постоянным расходом.

Математическое моделирование осуществлялось при следующих допущениях:

- после открытия клапана подачи, при условии постоянства давления подачи, расход гидразина в течение всего рабочего импульса остается постоянным, не зависящим от процессов, протекающих в реакторе;
- течение рабочей среды в канале происходит в ламинарном режиме;
- образующиеся газы считаются идеальными;
- выполняются условия применения модели сплошной среды;
- отсутствуют засорения в элементах конструкции микро-ЖРД;
- свойства каталитической поверхности в течение процесса разложения гидразина остаются постоянными.

Структурная схема обобщенной математической модели микро-ЖРД показана на рис. 2. Эта модель позволяет рассчитать процессы гидро – газодинамического течения в

распределительном блоке, каталитическом реакторе и сопле с учетом химических реакций и тепловыделения.

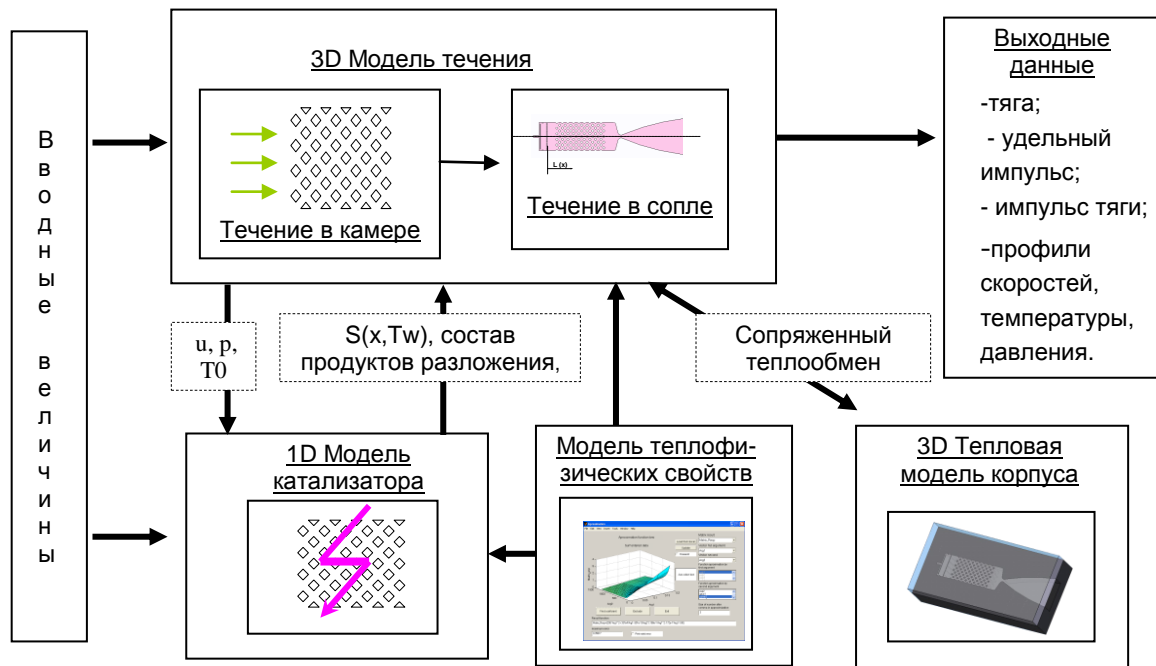


Рис. 2. Структура математической модели

На входе в модель задаются геометрия камеры, расход и температура гидразина, температура стенок, температура и давление окружающей среды, режим работы, длительности рабочих импульсов и интервалов между ними.

Чтобы упростить математическое описание выделения тепла в реакторе и его распространения в корпусе двигателя, предполагается, что в камере расположен локальный источник тепла мощностью $S(x, T_w)$, который рассчитывается при решении тепловой задачи каталитического микрореактора (для заданной конструкции), как функция пространственной переменной и температуры поверхности катализатора.

Расчет течения в камере микродвигателя производился на основе уравнений Навье-Стокса и энергии с учетом теплоотвода в стенки корпуса микродвигателя. Эти уравнения решаются численно методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS CFX. Распределение температуры в корпусе микро-ЖРД находится из решения нестационарного трехмерного уравнения теплопроводности.

По результатам расчетов получаем распределения компонент вектора скорости, давления, температуры, по которым можно определить и другие, интересующие нас выходные параметры: тягу, импульс тяги, удельный импульс и т.д.

Разложение гидразина может происходить по нескольким схемам, расчет ведется по следующим уравнениям:

$$3N_2H_4 = 4NH_3 + N_2, \quad H_{\text{HET}} = 3502 \text{ кДж/кг}, \quad (1)$$

$$2N_2H_4 = 2NH_3 + N_2 + H_2, \quad H_{\text{НОМ}} = 3021 \text{ кДж/кг}, \quad (2)$$

где H_{HET} , $H_{\text{НОМ}}$ - тепловыделения за счет гетерогенной каталитической и гомогенной термической реакций разложения гидразина.

При принятых допущениях тепловые процессы в канале можно считать квазистационарными, и баланс тепла для газа на участке канала длиной Δx будет определяться уравнением

$$(c_{pV} \cdot \dot{m}_V + c_{pPr} \cdot \dot{m}_{Pr}) \cdot \frac{dT}{dx} = H_{\text{HET}} \cdot j_D \cdot \Pi + H_{\text{НОМ}} \cdot K_0 \cdot C \cdot F - q_C \cdot \Pi, \quad (3)$$

где c_{pV} , c_{pPr} - теплоёмкости паров гидразина и продуктов его разложения; j_D - величина диффузионного потока на поверхность катализатора; K_0 - кинетический коэффициент термической реакции разложения гидразина; C - концентрация гидразина; Π , F - периметр и площадь сечения микроканала; q_C - удельный тепловой поток в стенку канала.

Реакция разложения топлива ведет к уменьшению массового расхода его паров \dot{m}_V . Этот процесс описывается следующим дифференциальным уравнением:

$$\frac{d\dot{m}_V}{dx} = -j_D \cdot \Pi - K_0 \cdot C \cdot F. \quad (4)$$

Результаты расчетов

На рис. 3. представлен результат расчета распределения скорости в каталитическом реакторе. Диаметр круглых элементов реактора элементов и расстояние между ближайшими элементами составляет 50 мкм. Расчет производился для давления на входе 0,2 МПа, температуры на входе 293 К и давления на выходе 0,1 МПа.

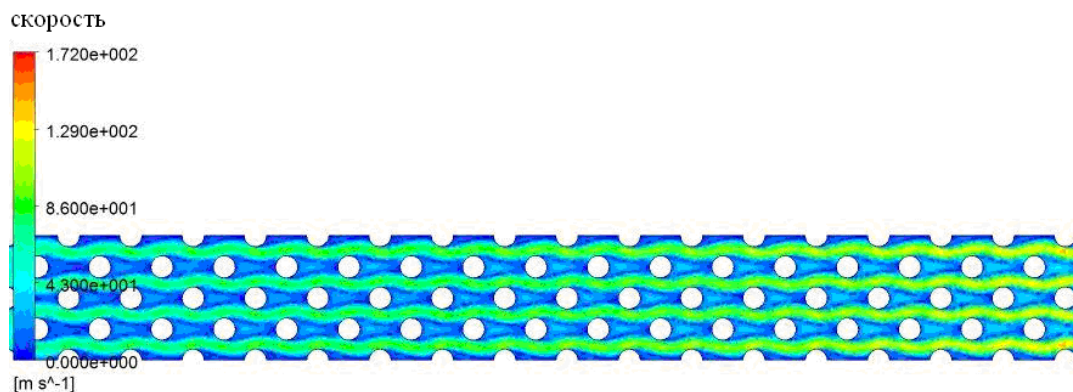


Рис. 3. Контур распределение модуля скорости на оси симметрии каталитического реактора

На рис. 3 показаны течения в четырех каналах, влияние перетечек между которыми мало. Результаты расчетов распределения температуры вдоль единичного канала с учетом химических реакций при температуре стенок, равной и 293 К 493 К и 693 К, показаны на рис. 4. Расход топлива принимался равным 0,071 мг/с. На рис. 4 прослеживаются три тепловые режимные зоны (нагрева двухфазной среды, испарения жидкой фазы, течения однофазной среды) [2].

Первая зона заканчивается тогда, когда температура двухфазной среды достигает температуры кипения. Высокий диффузионный поток капель гидразина на поверхность катализатора является причиной того, что протяженность зон I и II мала. Зона III оказывается более протяженной. В ней происходит каталитическое разложение паров гидразина на поверхности катализатора. Температура матрицы оказывает заметное влияние на расположение и величину температурного максимума в канале. Далее температура газа начинает падать.

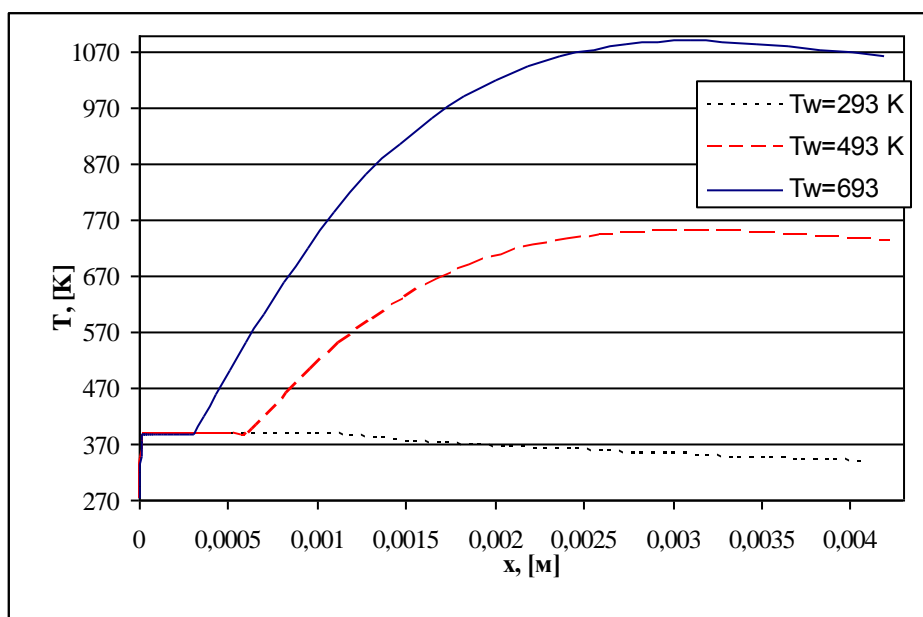


Рис. 4. Распределение температуры по длине канала каталитического реактора

Результаты расчета микросопла показано на рис. 5. Глубина травления 150 мкм, давления на входе 0,3 МПа, температура на входе 372 К.

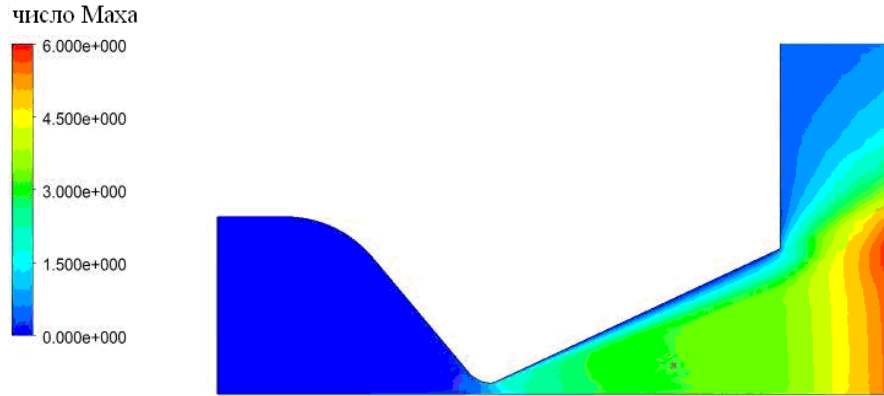


Рис. 5. Распределение числа Маха на оси симметрии

Отмечено нарастание дозвукового пограничного слоя по длине сопла, которое может приводить к уменьшению числа Маха в его сверхзвуковой части. Значение числа Маха на срезе сопла составляет порядка трех. Было проведено сравнение полученных результатов расчетов течения в микросопле с аналогичными данными, опубликованными в [4] и получено хорошее совпадение результатов.

Значения тяги и удельного импульса микродвигателя определяются по рассчитанным значениям скорости, давления и плотности на срезе сопла по известным формулам [3]:

$$P = \dot{m}w_a + (p_a - p_H)F_a, \quad (5)$$

где $w_a = \frac{\int_{F_a} \rho w dF}{\int_{F_a} \rho dF}$ – средняя скорость на срезе сопла, \dot{m} – массовый расход, S – площадь

выходного сечения сопла, p_a и p_H – давления на срезе сопла и окружающей среды, соответственно.

Импульс тяги и удельный импульс определяются по следующим формулам:

$$I_{bit} = \int_0^{\tau} P(t) dt; \quad (6)$$

$$I_y = \frac{I_{bit}}{m}; \quad (7)$$

где τ – время работы двигателя, m – масса израсходованного топлива.

Исследовалось два вида плоского сопла: профилированное сопло и непрофилированное сопло (рис. 5). Значения тяги и удельного импульса для второго варианта оказались несколько выше. Были проведены расчеты по определению оптимальной длины

сверхзвуковой части сопла и угла расширения. Результаты составили порядка 0,43 мм и 50°, соответственно.

Результаты расчетов числа Маха для распределительного блока, пакета катализатора и сопла показаны на рис. 6. Расход принимался равным 3,124 мг/с, температура гидразина на входе 293 К. Расчет проводился с учетом теплоотвода в стенки корпуса микродвигателя. Результаты расчетов распределения температуры в камере микро-ЖРД и корпусе двигателя приведены на рис. 7.

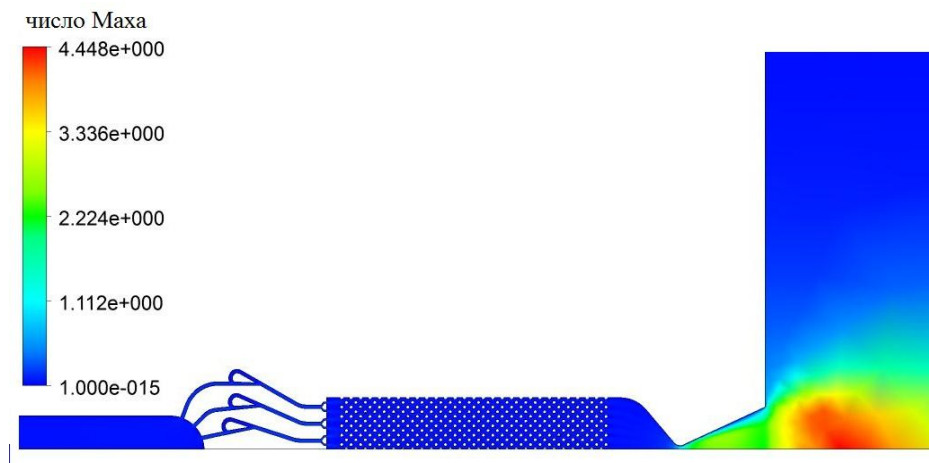


Рис. 6. Контур распределения числа Маха на оси симметрии микродвигателя

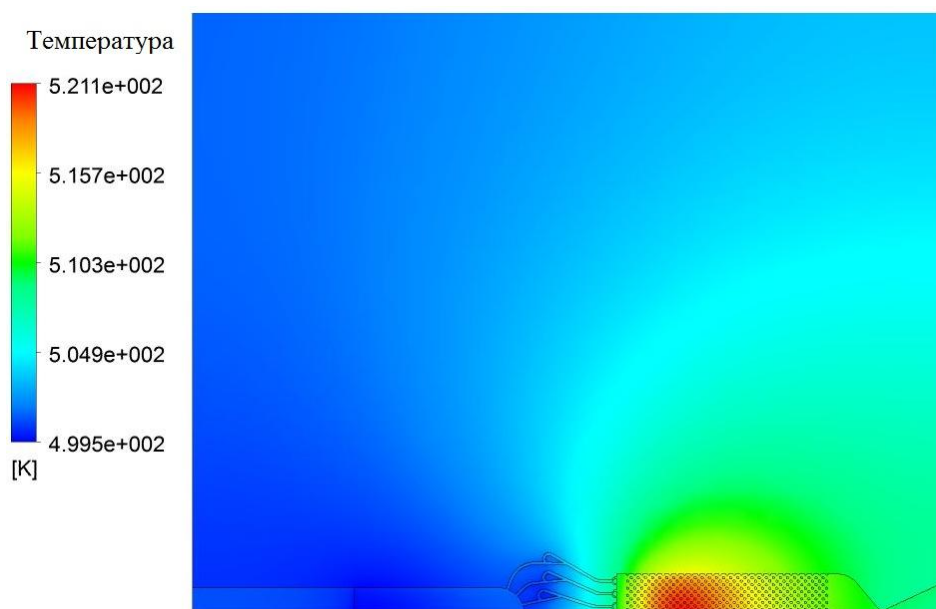


Рис. 7. Распределение температуры в корпусе микро-ЖРД

Максимальная температура потока (порядка 700 К) достигается на небольшом расстоянии от входа в каталитический реактор, в сопло поступают продукты разложения с

температурой, близкой к 560 К. Максимальная температура корпуса 520 К достигается в элементах катализатора.

По результатам расчетов выполнена оценка тяги и удельного импульса, которые составили 3,06 мН и 1000 м/с соответственно. Число Рейнольдса в критическом сечении составило 1710, что подтверждает ламинарный характер течения. Удельный импульс микро-ЖРД меньше удельного импульса макросистем подобного типа из-за интенсификации теплоотвода в стенки корпуса микродвигателя и увеличения вязкостных потерь на трение.

Результат расчета изменения тяги микро-ЖРД по времени дан на рис. 8. Расход топлива принимался равным 3,124 мг/с, начальная температура корпуса микродвигателя – 315 К.

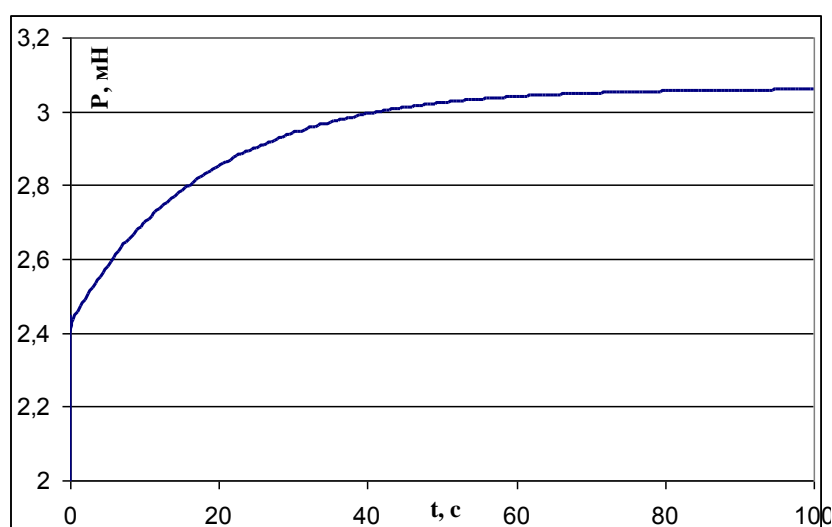


Рис. 8. Изменение тяги микро-ЖРД по времени в стационарном режиме работы

Тяга растет в первые секунды, а после 60 с практически стабилизируется, приближаясь к стационарному значению 3,05 мН. После 100 с работы средняя температура поверхности каталитического реактора составила 515 К.

Изменения выходных параметров микро-ЖРД в импульсном режиме работы показано на рис. 9. Время включения, время выключения принималось равным 0,1 с.

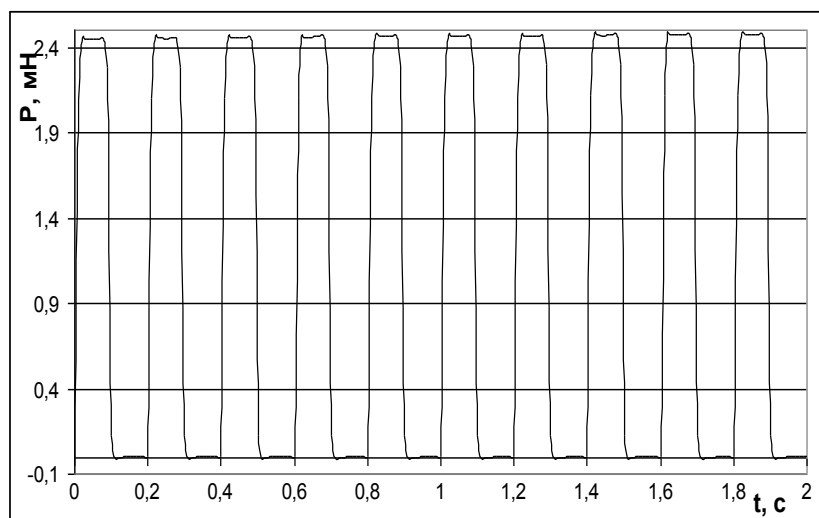


Рис. 9. Изменение значения тяги в течение 10 импульсов

На рис. 9 видно, что максимальная тяга практически не меняется в течение 10 импульсов. На рис. 10 показано изменение удельного импульса в течение 10 рабочих импульсов.

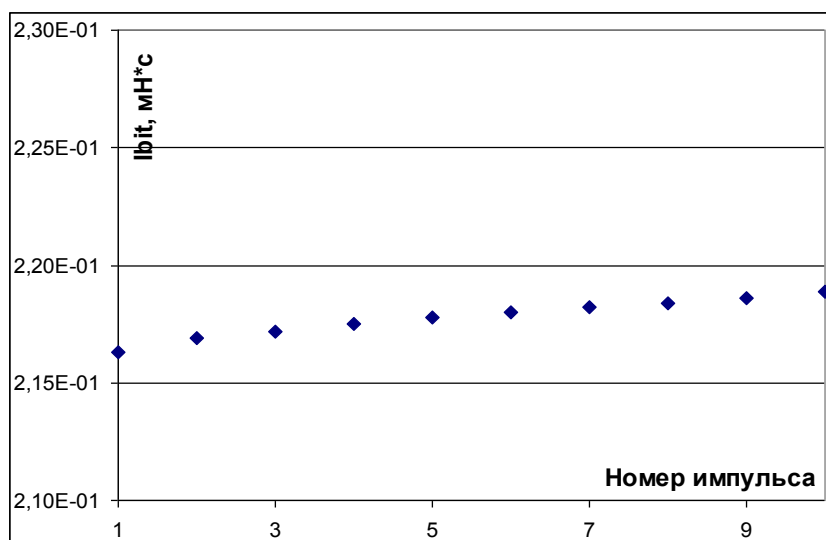


Рис. 10. Изменение значения удельного импульса для десяти пусков

На рис. 10 наблюдается тенденция небольшого роста удельного импульса со временем. При этом значения импульсов тяги для первого и десятого пусков составили 0,216 и 0,219 мН·с, соответственно.

Заключение

Созданы обобщенная модель рабочих процессов в микро-ЖРД на однокомпонентном топливе и алгоритм её решения. Разработаны математические модели процессов

преобразования монотоплива (гидразина) в конечные газообразные продукты в трактах каталитического реактора, имеющих поперечные размеры в несколько десятков микрометров. На основе этой модели рассчитывается функция эквивалентного тепловыделения в канале, что позволяет использовать результаты расчетов реактора при моделировании теплообмена в корпусе микродвигателя.

Разработаны гидро – и газодинамические модели процессов течения в элементах камеры микро-ЖРД. Проведены расчеты распределения давления и скорости газов в микроканалах. Обосновано применение уравнений модели с граничными условиями «непроскальзывания» на стенках.

Для микро-ЖРД с критическим сечением 95×105 мкм рассчитаны значения тяги и удельного импульса. Проведено сопоставление результатов распределения скорости газового потока в микросопле Лавала с опубликованными в зарубежной печати данными и получено хорошее соответствие.

Разработанная методика математического моделирования и результаты расчетов использованы в рамках совместного проекта МАИ с фирмой «Astrium GmbH». Они могут быть применены в качестве инструмента для оптимизации выходных характеристик при создании опытного образца микро-ЖРД и для сокращения времени на отработку микродвигателя.

Библиографический список

1. D. Telitshkin, S. Ziegenhagen. MEMS based liquid chemical micro propulsion for active control of nano and microsatellites. Тез. докл. Международный симпозиум по космической технике. 2008. Греция.
2. . Коломенцев А.И., Байков А.В., Мартыненко С.И., Якутин А.В. и др., Проблема разработки микродвигательных установок. // Известия вузов. Сер. «Авиационная техника». Казань: Изд-во КГТУ, 2010 - № 2, с. 53-55.
3. А.П. Васильев, В.М. Кудрявцев, В.А. Кузнецов и др. Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей. – М.: Высш. шк, 1993 -383 с.
4. *Louisos W.F., Hitt D.L.* Optimal expansion angle for viscous supersonic flow in 2-D micro-nozzles. 35th AIAA Fluid dynamics conference and exhibit. 2005.

Сведения об авторах

Якутин Александр Владимирович, младший научный сотрудник Московского авиационного института (государственного технического университета).

МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993;
тел. (499) 190-27-69; e-mail: alyacutin@mail.ru.