

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОЖИДКОСТНЫХ ТЕЧЕНИЙ В МИКРОКАНАЛАХ РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМЕТРИИ С УЧЕТОМ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ, ТРЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕНА С ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДОЙ

Предложено математическое описание газожидкостных течений в микроканалах различной геометрии с учетом химических реакций, трения и теплообмена. Проведено сопоставление результатов расчета течения в микроканалах с опубликованными данными.

Газожидкостные течения в микроканалах сложной геометрии с химическими реакциями и теплообменом показаны на примере течения в трактах жидкостных ракетных микродвигательных установок на однокомпонентном топливе. Представлены результаты расчетов процессов каталитического и термического разложения гидразина, гидро- и газодинамических процессов течения в распределительном блоке, каталитическом реакторе и сопле, процессов теплообмена в камере двигателя, с учетом теплоотвода в стенку корпуса.

Ключевые слова: микродвигательная установка, наноспутники, математическое моделирование, каталитический реактор, микросопло, разложение гидразина.

Интерес к микроканалам обусловлен стремлением к миниатюризации различных конструктивных элементов, в частности, топливных элементов, микронасосов, микроклапанов, ракетных микродвигательных установок.

Микродвигательные установки предназначены для коррекции орбиты и положения микрокосмических аппаратов в космическом пространстве.

Использование микрокосмических летательных аппаратов (микро-КЛА) – это перспективное направление, позволяющее сократить стоимость жизненного цикла спутников для различных космических миссий путем уменьшения массы и размеров этих аппаратов.

Повышение требований к точности управления положением микро-КЛА обуславливает использование микродвигательных установок, реализующих малые значения тяги (порядка 1 мН).

В данной статье рассматриваются газожидкостные течения в микроканалах на примере жидкостного ракетного микродвигателя (микро-ЖРД).

Микро-ЖРД на однокомпонентном топливе состоит из следующих основных элементов: распределительного блока, каталитического реактора и сопла. Данный двигатель представляет собой тонкую пластину (ЧИП) следующих размеров: длина – 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. Каталитический реактор может быть представлен в виде совокупности извилистых микроканалов, по которым протекает реагирующая среда.

Расчет параметров течения в микроканале. Исследованию газодинамических течений в микроканалах уделяется значительное внимание в экспериментальных и теоретических работах [1; 2].

При моделировании газожидкостных течений в микроканалах использовалось сплошное представление среды. Применимость такого подхода определяется местным значением числа Кнудсена:

$$Kn = l / \Lambda < 0,1,$$

где l – длина свободного пробега частиц текущей среды; Λ – характерный размер физической системы.

Расчет течения в микроканале производился на основе уравнений Навье–Стокса и энергии с учетом теплоотвода в стенку корпуса микроканала. Эти уравнения могут быть решены численно методом конечных элементов. Распределение температуры в корпусе микро-ЖРД определяется из решения нестационарного трехмерного уравнения теплопроводности.

Ввиду малого размера проходных сечений каналов каталитического реактора и малых значений давления в камере (0,1–0,3 МПа), можно предполагать, что каналах устанавливается ламинарное течение газовой среды с профилем скоростей Пуазейля–Гагена.

Газожидкостные течения в микроканалах с учетом химических реакций и теплообмена имеют ряд особенностей:

1) большое отношение поверхности к объему, что приводит к увеличению тепловых потерь через стенки двигателя;

2) уменьшение эквивалентного диаметра канала d_e при постоянном значении критерия Нуссельта приводит к возрастанию коэффициента теплоотдачи α от потока в канале в его стенки:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d_e}{\lambda},$$

где λ – теплопроводность паров гидразина.

Этот эффект вызывает в условиях микрореактора интенсификацию теплообмена в его каналах [3; 4];

3) подобно коэффициенту теплоотдачи, величина коэффициента массообмена β между топливом в микроканалах камеры и пристеночной областью при постоянном значении критерия Шервуда также будет возрастать:

$$Sh = \frac{\beta \cdot d_e}{D},$$

где D – коэффициент диффузии паров гидразина в среде, заполняющей канал.

В результате, все капли, имеющиеся в двухфазном потоке на входе в канал, будут интенсивно выноситься

на поверхность катализатора, и двухфазный поток в канале быстро прекратит свое существование.

Математическое моделирование осуществлялось при следующих допущениях:

- течение рабочей среды в канале происходит в ламинарном режиме;
- образующиеся газы считаются идеальными;
- выполняются условия применения модели сплошной среды;
- отсутствуют засорения в микротрактах;
- свойства каталитической поверхности остаются постоянными.

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

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

где c_{pV} , c_{pPr} – теплоемкости паров монотоплива и продуктов его разложения; j_D – величина диффузионного потока на поверхность катализатора; K_0 – кинетический коэффициент термической реакции разложения монотоплива; C – концентрация паров монотоплива; Π , F – периметр и площадь сечения микроканала; q_C – удельный тепловой поток в стенки канала; $H_{\text{НЕТ}}$, $H_{\text{НОМ}}$ – тепловыделения за счет гетерогенной каталитической и гомогенной термической реакций разложения.

Реакция разложения топлива ведет к уменьшению массового расхода его паров $\dot{m}_V$. Этот процесс

описывается следующим дифференциальным уравнением:

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

Результаты расчетов течения в плоском микроканале. Для проверки достоверности принятых в математической модели допущений были произведены расчеты газового течения (азота) в плоском микроканале следующих размеров: длина канала $L = 3$ мм, ширина – 40 мкм, высота $H = 1,2$ мкм. Температура газа и стенок микроканала 314 К, давление на выходе $p_{\text{вых}} = 0,1$ МПа, число Кнудсена на выходе $Kn = 0,058$. Эти данные взяты из работы [1].

Сравнение результатов расчетов распределения скорости и давления вдоль канала с данными работы [1] приведены на рис. 1.

Сравнение производилось для трех значений отношения давлений $dP = p_{\text{вх}} / p_{\text{вых}}$.

Хорошее совпадение результатов расчетов с опубликованными данными наблюдается на рис. 1. Нелинейный характер распределения давления является следствием сжимаемости газа и молекулярных эффектов.

Проведен анализ теплообмена между газовой средой в микроканале и его стенками при импульсной подачи горячего газа (паров воды).

Температура на входе составляет 800 К, длина канала – 2 мм, начальная температура стенок – 293 К, время импульса и длительность паузы между импульсами – 0,1 с.

Зависимость температуры газа от времени в пристеночной области канала для двух точек вдоль канала в течение 10 импульсов показана на рис. 2.

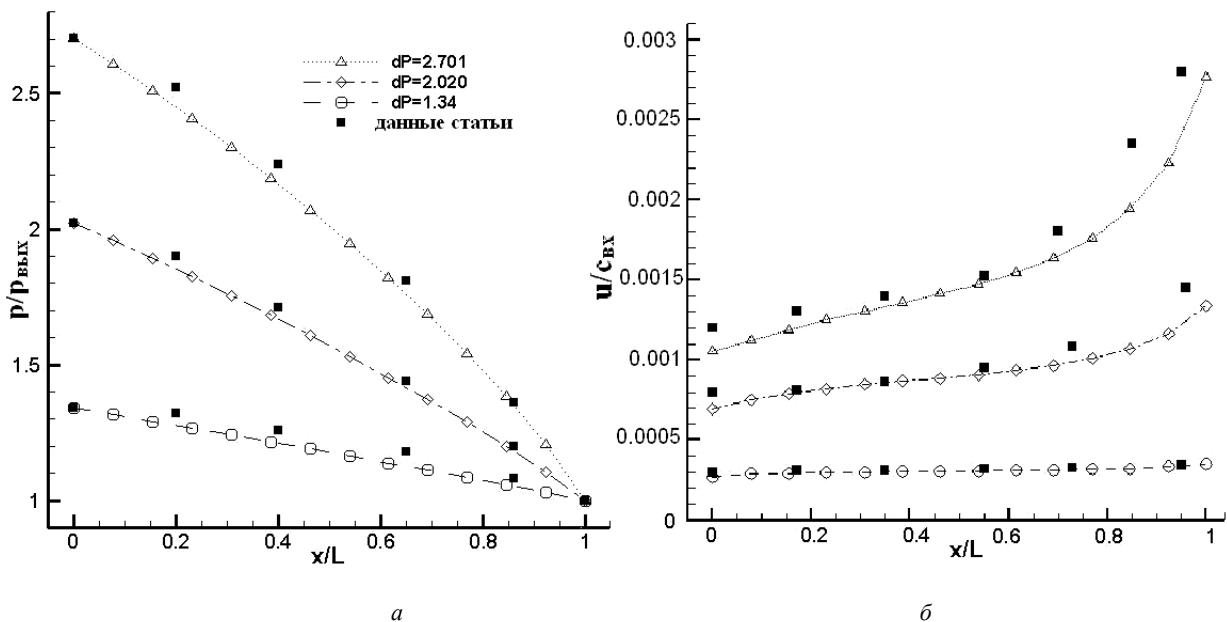


Рис. 1. Распределение безразмерного давления (а) и скорости (б) вдоль оси канала, $c_{\text{вх}} = 361$ м/с – скорость звука на входе в канал

Как видно из графика, происходит быстрое остывание пара практически до температуры стенки, потом наблюдается довольно медленный подъем температуры. После середины канала $x \geq 0,5L$ пульсации температуры сглаживаются. Эти результаты обусловлены интенсификацией теплообмена в микроканалах.

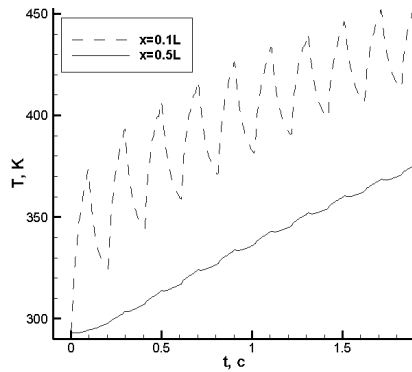


Рис. 2. Изменение температуры среды в пристеночной области канала для импульсного режима подачи горячего пара

Результаты расчетов течения в микроканале сложной формы. Исследовались элементы ЧИПа микро-ЖРД. Распределение модуля скорости в распределительном блоке показано на рис. 3. На вход подается жидкий гидразин с расходом 1,55 мг/с, глубина трактов рана 150 мкм. Конструкция распределительного блока выбрана таким образом, чтобы топливо равномерно попадало в каталитический реактор и исключались обратные потоки из каталитического реактора после окончания импульса подачи топлива.

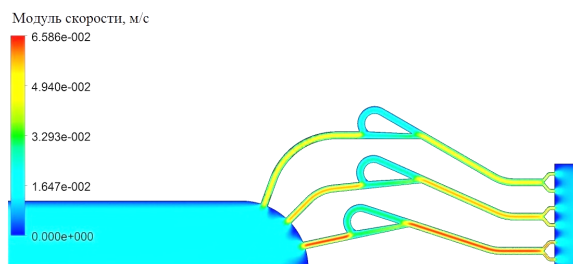
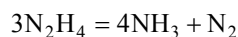


Рис. 3. Поле скоростей в распределительном блоке

Были проведены тепловые расчеты канала каталитического реактора с учетом химических реакций разложения гидразина. Реактор рассматривался как система, состоящая из 22 криволинейных каналов.

Разложение гидразина может происходить по нескольким схемам. Наиболее вероятно, что каталитическое разложение будет происходить согласно уравнению



Термическое разложение будет осуществляться согласно выражению



Результат расчета температуры в единичном канале с учетом реакций показан на рис. 4. Расход топлива принимался равным 0,14 мг/с, длина канала — 4,3 мм, ширина — 50 мкм, высота — 150 мкм, температура стенки принималась постоянной на всем протяжении импульса и равной 493 К.

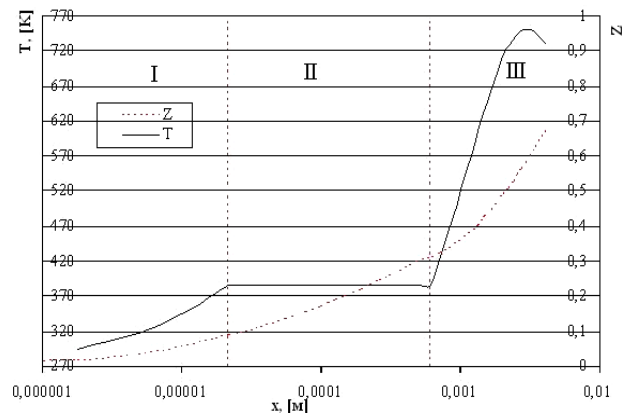


Рис. 4. Распределение степени разложения гидразина $Z = C_{Pr}/\rho_\Sigma$ и температуры T по длине канала каталитического реактора

Три тепловых режимных зоны: нагревание двухфазной среды, испарение жидкой фазы, течение однофазной среды прослеживаются на рис. 4.

Высокий диффузионный поток капель гидразина на поверхность катализатора является причиной того, что протяженность I и II зон мала. Поэтому длина канала представлена в логарифмических координатах (рис. 4). Зона III оказывается более протяженной. В ней происходит каталитическое разложение паров гидразина на поверхности катализатора.

Температура поверхности каналов каталитического реактора оказывает заметное влияние на расположение и величину температурного максимума в канале.

Результаты моделирования газодинамических процессов течения в микросопле представлены на рис. 5. Для сравнения представлены результаты расчетов течения газа (перекиси водорода) в аналогичном сопле (рис. 6), взятые из работы [2].

Характеры течений на рис. 5, 6 идентичны, небольшая разница по максимальным значениям числа Маха вызвана тем, что продукты разложения гидразина имеют значительно меньший коэффициент динамической вязкости по сравнению с продуктами разложения перекиси водорода. Большие области дозвукового пограничного слоя, обусловленные вязкостью газовой смеси и микроразмерами сопла, видны на рис. 5 и 6.

Результаты расчетов числа Маха для распределительного блока, пакета катализатора и сопла показаны на рис. 7. Расход принимался равным 3,12 мг/с, температура гидразина на входе составила 293 К. Расчет проводился с учетом теплоотвода в стенки корпуса микродвигателя и излучения. Результаты расчетов распределения температуры в камере микро-ЖРД и корпусе двигателя приведены на рис. 8, 9.

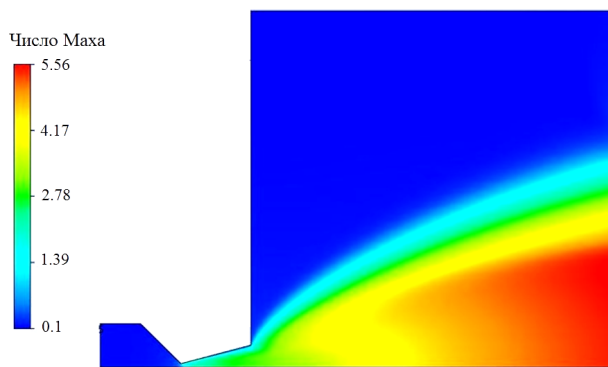


Рис. 5. Распределения числа Маха для гидразина

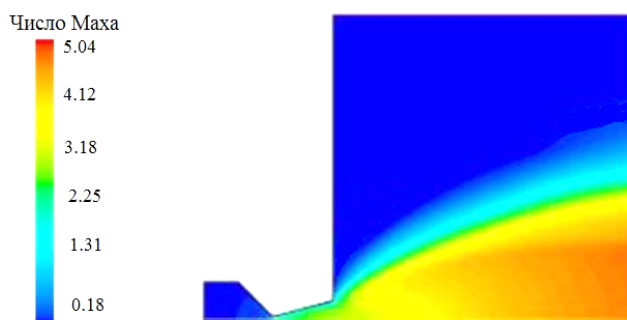


Рис. 6. Распределение числа Маха для перекиси водорода [2]

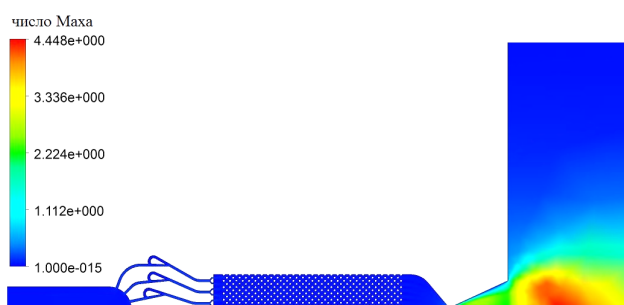


Рис. 7. Контур распределения числа Маха на оси симметрии микродвигателя



Рис. 8. Контур распределение температуры среды

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.

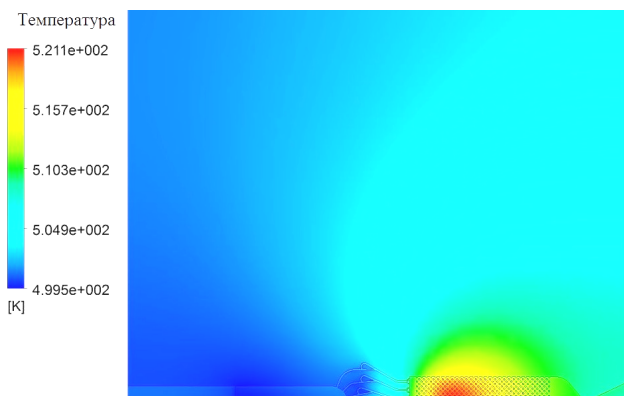


Рис. 9. Распределение температуры в корпусе микро-ЖРД

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.

Созданы модели газожидкостных течений в микроканалах различной геометрии с учетом химических реакций, трения и теплообмена.

Проведено сопоставление результатов распределения скорости и давления газового потока в микроканале и микросопле Лаваля с опубликованными данными и получено хорошее соответствие.

Разработаны математические модели процессов преобразования монотоплива (гидразина) в конечные газообразные продукты в трактах микроканалов, имеющих поперечные размеры в несколько десятков микрометров.

Выполненные одномерные расчеты позволяют понять характер протекания химических реакций, масштаб и расположение зоны интенсивного протекания реакции. В дальнейшем, для более точной картины процессов необходимо решение многомерной модели уравнений Навье–Стокса с учетом кинетики химических реакций и двухфазности потока в каналах.

Библиографические ссылки

1. Modeling gas flow through microchannels and nanopores / S. Roy, R. Raju, H. Chuang, B. Cruden and M. Meyyappan // J. of applied physics. 15 April, 2003. Vol. 93. № 8. P. 4870–4879.
2. 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. AIAA 2005–5032.
3. Забабахин Е. И. Явление неограниченной кумуляции. М. : Изд-во АН СССР, 1990.
4. Накоряков В. Е., Кузнецов В. В. Тепломассообмен при фазовых переходах и химических превращениях в микроканальных системах // Тр. Рос. нац. конф. по теплообмену. М. : Изд-во МЭИ. 2006. С. 33–37.

A. V. Yakutin, A. I. Kolomentsev

**MATHEMATICAL MODELING OF GAS-LIQUID FLOW IN MICROCHANNELS
OF VARIOUS GEOMETRY UNDER CHEMICAL REACTIONS, FRICTION
AND HEAT EXCHANGE**

The authors offer a mathematical description of gas-liquid flow in micro channels of various geometry with the account of chemical reactions, friction and heat exchange and make a comparison of results of calculation of fluid flow in micro channels with the data which were already published.

Gas-liquid flows in micro channels of complex geometry with chemical reactions and heat exchange are shown on an example of flow in micro channels of liquid monopropellant micro thruster. Results of calculations of processes of catalytic and thermal decomposition of a hydrazine, hydro- and gas flow in the distributive block, the catalytic reactor and a nozzle, heat exchange processes in the engine chamber, are presented.

Keywords: microthruster, nanosatellite, mathematical modeling, catalytic reactor, micronozzle, dissociation of hydrazine.

© Якутин А. В., Коломенцев А. И., 2012