

УДК 539.3

В.О.Сабадаш, гр. 5055/2, А.Г.Долганов (асп., каф. РиПГС),  
А.И.Боровков, к.т.н., проф., Е.Н.Пятышев, к.ф.-м.н, доц.

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИКИ И НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ СОПЛА МИКРОРЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Микрореактивные двигатели являются одними из перспективных активаторных устройств, разрабатываемых в рамках современной микромеханики. Эти двигатели могут быть использованы для ориентирования и стабилизации малых космических объектов, а также в качестве локальной или распределенной реактивной тяги новых типов летательных аппаратов аэро- и космического назначения, для управления пограничным слоем летающих объектов и в ряде преобразующих энергетических устройств и агрегатов различного назначения. Отличительные особенности реактивных микродвигателей – экономичность (рекордно большое отношение тяги к весу) и высокое (миллисекундное) быстродействие. Эти особенности обеспечиваются минимальными размерами, высоким давлением в рабочей камере и сверхзвуковыми скоростями истечения реактивной струи.

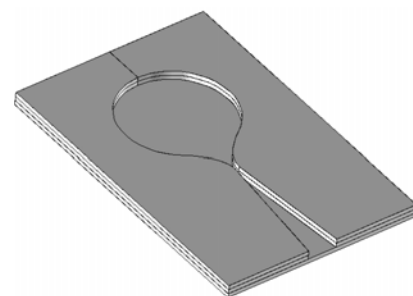


Рис. 1

При проектировании реактивных микродвигателей необходимо учитывать воздействие значительные локальные напряжения, возникающие за счет статического и динамического нагружения. Величины и характер этих напряжений определяются термогазодинамическими процессами в камере и сопле, которые для микро размеров изучены крайне слабо. В связи с этим необходимо математическое и экспериментальное

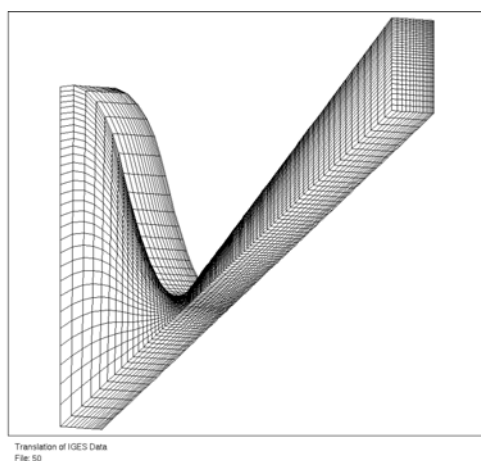


Рис. 2

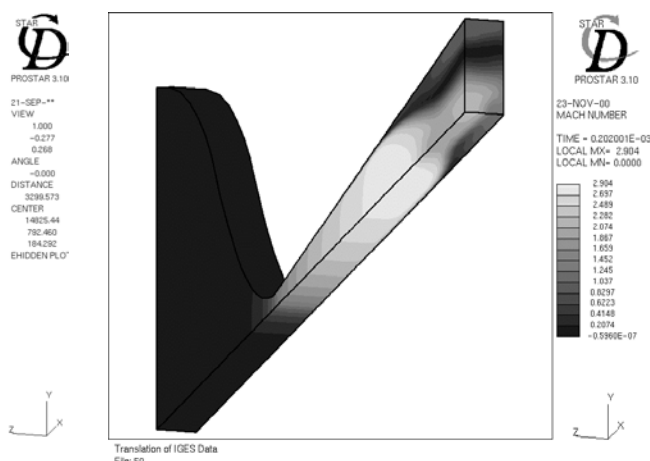


Рис. 3

моделирование этих процессов.

Наиболее удобным объектом начальной фазы экспериментального моделирования является «холодный» двигатель, в камере которого требуемое статическое давление создается сжатым воздухом. В ходе предварительных испытаний для «холодного» двигателя с высотой сопла 1.2 мм и шириной критического сечения 0.4 мм при давлении в камере 0.6 МПа была получена скорость истечения на выходе из сопла порядка 1.5 М.

Далее проводилось численное моделирование газодинамических процессов. Решение трехмерной нестационарной задачи газодинамики проводилось с помощью программного пакета STAR-CD фирмы Computational Dynamics. Течение вязкое сжимаемое турбулентное. Сетка представлена на рис. 2. Расчет проводился для нескольких значений давления на входе. Для одного из них –  $p_{вх}=10$  атм. на рис. 3 представлены числа Маха. В результате решения задачи было получено также поле давлений, которые затем были использованы в качестве входных данных при расчете на прочность. Необходимо отметить, что полученные результаты численного моделирования носят предварительный характер. С помощью этих расчетов отработывалась методика расчетных исследований.

Далее проводился расчет напряженного состояния сопла. В качестве входных данных использовалось поле давлений, полученное в газодинамическом расчете. Сопло выполнено из ситалла, который имеет следующие механические свойства:  $E_{\text{Ситалл}} = 135$  ГПа – модуль Юнга,  $\nu_{\text{Ситалл}} = 0.25$  – коэффициент Пуассона.

В силу симметрии конструкции и нагрузок рассматривалась только  $\frac{1}{4}$  часть сопла. Руководствуясь опытными данными и результатами газодинамического расчета, было принято решение моделировать распределение давления внутри сопла самым простым образом: положить давление в камере постоянным и равным 10 атм. и далее линейно уменьшающимся до 0 от выхода из камеры до выходного отверстия сопла. Пространственная конечно-элементная модель представлена на рис. 4, ее характеристики :  $NE = 3236$ ,  $NN = 16853$ ,  $NDF = 50550$  ; где  $NE$  – общее число конечных элементов,  $NN$  – число узлов,  $NDF$  – общее число степеней свободы КЭ-модели.

На рис. 5 представлены результаты конечно-элементного анализа (интенсивность напряжений по Мизесу) и фотография сопла с возникшими во время испытаний дефектами. Видно, что зоны максимальных напряжений, выявленные в данном анализе, хорошо совпадают с местами возникновения трещин в реальном образце.

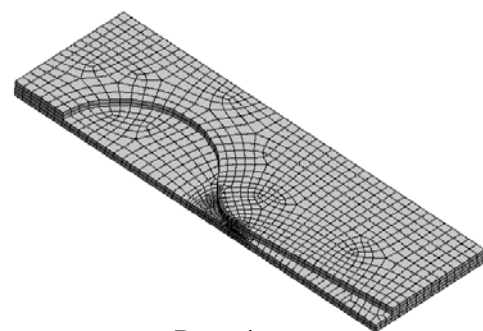


Рис. 4

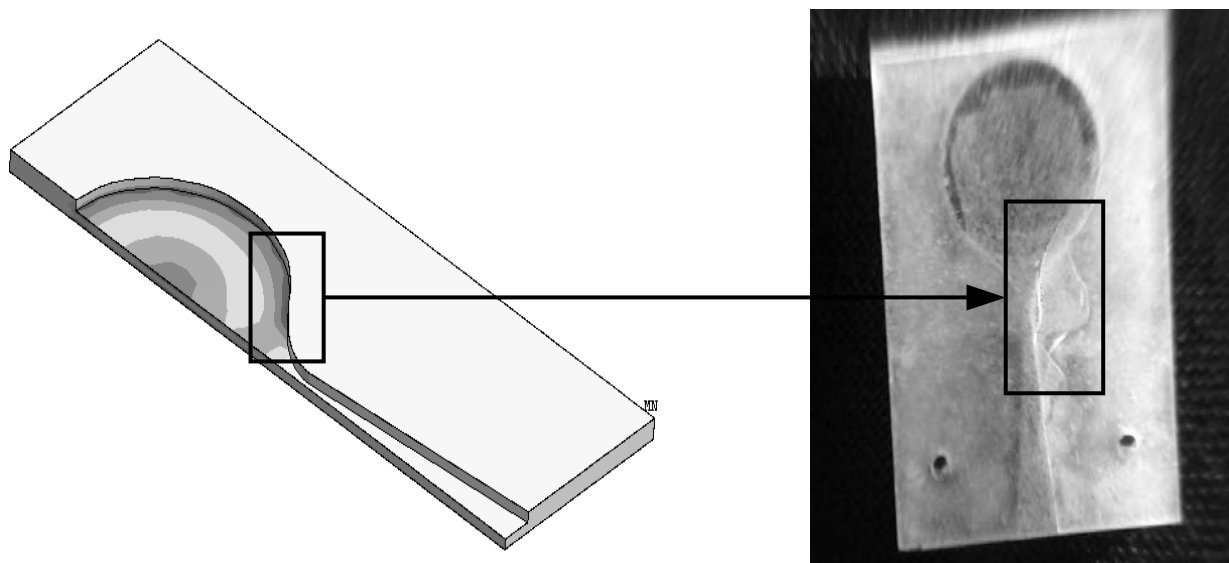


Рис. 5