

УДК 62-553

Б. Я. Бендерский, доктор технических наук, профессор, Ижевский государственный технический университет
А. А. Шаклеин, магистрант, Ижевский государственный технический университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ И КВАЗИСТАЦИОНАРНЫХ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ И ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В РЕГУЛЯТОРАХ РАСХОДА ШТОКОВОГО ТИПА ДВИГАТЕЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Выявлены пространственная структура потока, форма звуковой поверхности и зависимость коэффициента расхода от положения регулирующего элемента.

Ключевые слова: регулятор расхода, газодинамика, численное моделирование, коэффициент расхода.

Важную роль в работе энергетических установок летательных аппаратов выполняют узлы регулирования вектора тяги – регуляторы расхода продуктов сгорания.

В настоящее время проектирование регуляторов расхода основано на методиках, использующих экспериментальные результаты или одно- и двухмерные модели газодинамических процессов.

При проектировании конструкторам необходимо знать не только распределение газодинамических параметров в регуляторе, коэффициент теплоотдачи на поверхности корпуса регулятора, контактирующей с продуктами сгорания, а также интегральные характеристики (коэффициент расхода).

В связи со сложностью и трудоемкостью проведения натурного эксперимента (малые объемы каналов и полостей, высокие температуры, нестационарность, к-фаза) в работе проведено математическое моделирование этих процессов с использованием программного комплекса Ansys CFX.

Одним из видов регуляторов расхода является регулятор расхода штокового типа (рис. 1).

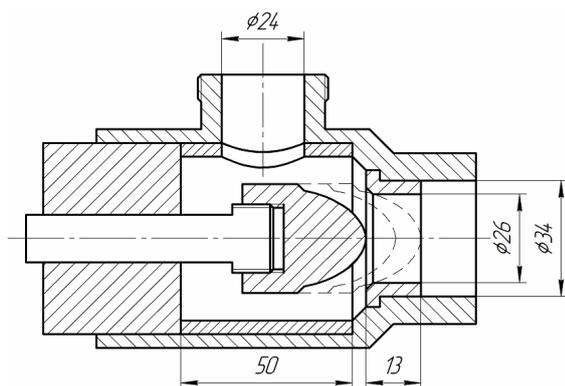


Рис. 1. Регулятор расхода штокового типа

В [1] приводятся результаты натурного и модельного экспериментов по определению параметров тепловых процессов (коэффициента теплообмена) и расходных характеристик. В связи с отсутствием в настоящее время методик, учитывающих нестационарность, пространственность, турбулентность, осуществлена постановка задачи по расчету нестационарных и квазистационарных трехмерных газо-

динамических и тепловых процессов в регуляторе расхода газа штокового типа.

Рассматривались две задачи. Первая – исследование квазистационарных газодинамических и тепловых процессов в регуляторе расхода при заданном положении регулирующего элемента. Численные расчеты проведены для рабочих тел «воздух» (показатель адиабаты 1,4, температура 300 К) и «продукты сгорания» (ПС) (показатель адиабаты 1,2, температура 2500 К). Вторая – исследование нестационарных газодинамических процессов в регуляторе расхода при поступательном перемещении управляющего элемента. Численные расчеты проведены для рабочего тела с показателем адиабаты 1,2 при температуре продуктов сгорания 2500 К на входе в регулятор.

В качестве математической модели использовалась система уравнений Навье – Стокса с осреднением по Рейнольдсу с использованием стандартной модели турбулентности $k-\epsilon$.

Квазистационарный режим работы регулятора. Для получения зависимости коэффициента расхода от положения штока расчет проводился без учета теплообмена между газовой фазой и корпусом регулятора.

В результате расчетов выявлено следующее.

- Пространственная структура потока в до-, около- и сверхзвуковых областях регулятора расхода (рис. 2). Звуковые линии обозначены черным цветом. Выявлена сильная несимметричность течения в донной области регулятора, где отрыв потока происходит по сложной замкнутой поверхности, центр которой не лежит на продольной оси регулятора. Из-за большой степени расширения сопла возникает ударная волна, которая взаимодействует с пограничным слоем (цифра 1 на рис. 2). В донной части (цифра 2 на рис. 2) формируется дозвуковое течение.

- Трансформация звуковой поверхности в критическом сечении (рис. 3). При уменьшении площади критического сечения звуковая поверхность перемещается вверх по потоку и изменяет форму.

- Зависимость коэффициента расхода регулятора для различных моделей рабочих тел и входных газодинамических параметров (T, p) (рис. 4). Анализ показывает, что коэффициент расхода практически не зависит от входной температуры газа, его удельной газовой постоянной и коэффициента адиабаты, а зависит от степени открытия регулятора.

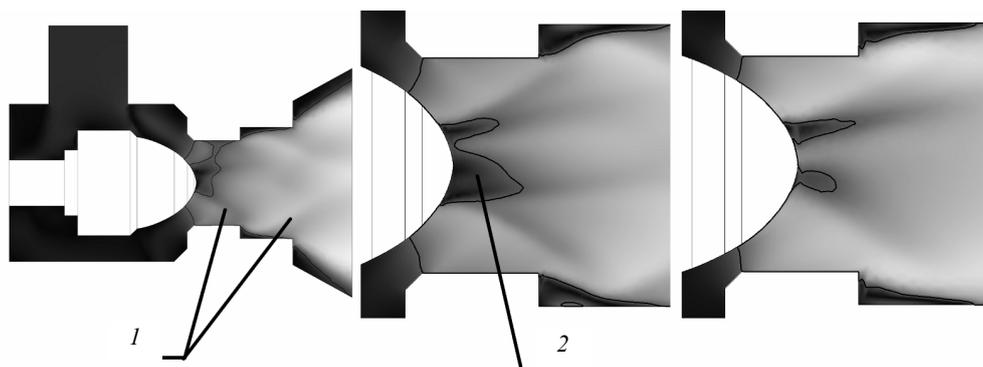


Рис. 2. Поле скоростей в плоскости симметрии при уменьшении площади минимального сечения



Рис. 3. Изменение формы звуковой поверхности при уменьшении проходного сечения

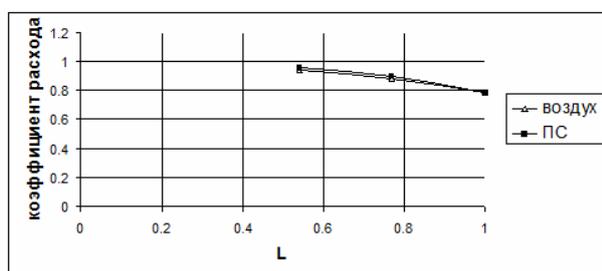


Рис. 4. Зависимость коэффициента расхода от положения штока

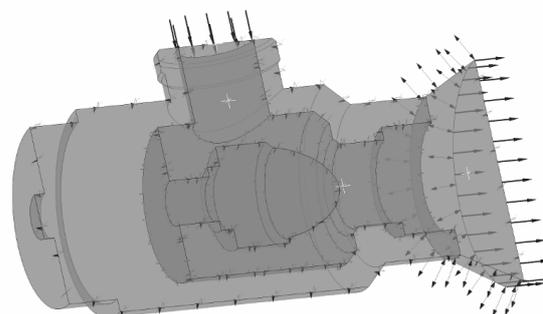


Рис. 5. Расчетная область в препроцессоре Ansys CFX для решения сопряженной задачи

Сопряженная задача теплообмена при квазистационарном режиме работы регулятора. Для сравнения результатов численного расчета и натурального

эксперимента решена сопряженная задача теплообмена (рис. 5).

На рис. 6 представлено распределение коэффициента теплоотдачи на корпусе регулятора (по линии A).

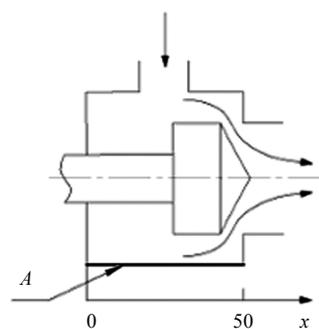
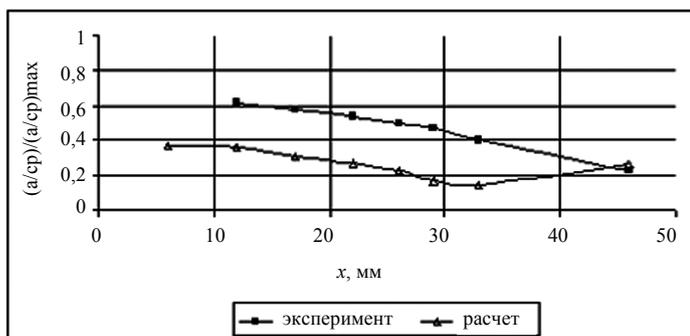


Рис. 6. Распределение коэффициента теплообмена на корпусе регулятора

Результаты расчета качественно согласуются с экспериментом за исключением области, расположенной вблизи критического сечения ($x = 40-50$). На интенсификацию теплообмена в этой области повлияла кольцевая вихревая структура.

Нестационарный режим работы. Исследовалось влияние перемещения регулирующего элемента на параметры течения. Решение задачи проводилось в осесимметричной постановке (рис. 7). Отличительная особенность моделирования нестационарного процесса связана с заданием скорости подвижной стенки регулирующего элемента, которая в данном расчете составляла 0,02 м/с. В качестве начальных условий использовались параметры течения, полученные при моделировании квазистационарного режима работы регулятора.

Для удобства представления результатов использована относительная координата $x_{отн}$ положения штока (координата x отнесена к максимальному положению штока регулятора). За ноль принято закрытое состояние регулятора.

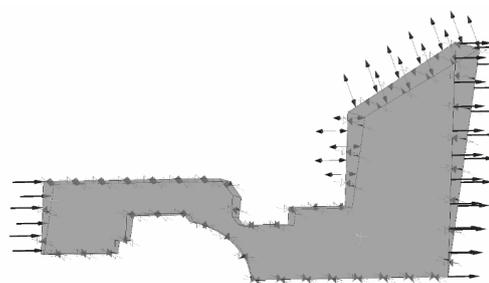


Рис. 7. Осесимметричная расчетная область

В результате расчетов выявлена динамика ударно-волновой структуры в сверхзвуковой части регулятора. Существенная перестройка структуры происходит при прохождении штоком интервала $x_{отн} = 0,65-0,61$ (рис. 8). На этом интервале изменяется угол наклона ударной волны с 11 до 30°, в результате чего уменьшается продольный размер циркуляционной зоны.

На исследуемом интервале ($x_{отн} = 0,77-0,46$) форма звуковой линии не изменяется.

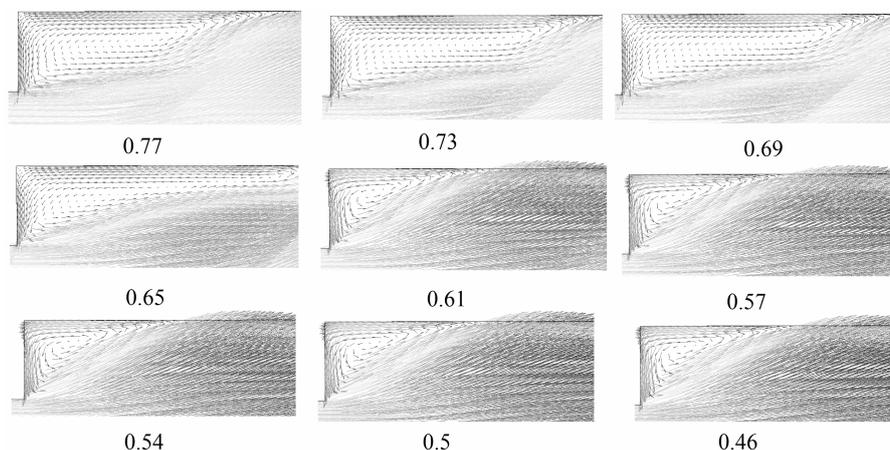


Рис. 8. Изменение структуры потока при перемещении штока

В результате исследований показано, что коэффициент расхода не зависит от входной температуры, удельной газовой постоянной и коэффициента адиабаты рабочего тела. Выявлено наличие дозвуковой зоны в донной области. Перестройка ударно-волновой структуры в сверхзвуковой части исследуемого регулятора расхода происходит на относительном интервале $x_{отн} = 0,65-0,61$.

Список литературы

1. Регулируемые твердотопливные двигательные установки: методы расчетов рабочих процессов, экспериментальные исследования / под ред. В. И. Петренко. – Уфа : Даурия, 1996. – 296 с.
2. Бендерский Б. Я., Шаклеин А. А. Квазистационарные и нестационарные процессы газодинамики и теплообмена в регуляторе расхода штокового типа // Струйные отрывные и нестационарные течения : тез. докл. междунар. конф. (СПб., 22–25 июня 2010 г.). – СПб., 2010. – С. 64.

B. Ya. Benderskiy, Doctor of Technical Sciences, Professor, Izhevsk State Technical University
A. A. Shaklein, Magstrand, Izhevsk State Technical University

Transient and Quasisteady-State Gas Dynamics and Heat Processes Simulation in Rod Type Flow Rate Regulator of Aircraft Engines

The spatial flow structure, shape of sonic surface and flow rate coefficient dependence as a function of controlling element position was elicited.

Key words: flow rate regulator, gas dynamics, numerical simulation, flow rate coefficient.