

Анализ газодинамического сжатия на основе модифицированной модели псевдоскачка Крокко

Картовицкий Л.Л.*, Левин В.М., Яновский Л.С

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия

**e-mail: levka_58@mail.ru*

Статья поступила 05.08.2020

Аннотация

Предложена модификация модели псевдоскачка Крокко, позволяющая в структуре математической модели сверхзвуковой прямоточной силовой установки с зоной торможения оценить распределение параметров при переходе сверхзвукового потока к дозвуковому режиму течения. Выполнено численное моделирование газодинамических параметров в канале предкамерного диффузора (изолятора) заданной геометрии. Численное решение построено с использованием принципа минимального производства энтропии. Проведена верификация предложенной модели на данных, полученных в ходе испытаний модельной камеры сгорания двухрежимного прямоточного воздушно-реактивного двигателя (ДПВРД). Модель предназначена для параметрических исследований в составе математических моделей прямоточной силовой установки.

Ключевые слова: газодинамическое сжатие, псевдоскачок, математическая модель, двухрежимный прямоточный воздушно-реактивный двигатель.

Постановка задачи

Устойчивость функционирования сверхзвукового прямооточного воздушно-реактивного двигателя (ПВРД) в диапазоне полетных чисел Маха более 3 ограничена срывными характеристиками газодинамически связанных в интегральной компоновке воздухозаборника и камера сгорания. Применение изолятора в схеме ПВРД позволяет сформировать зону торможения и обеспечить выравнивание сверхзвукового потока. При этом реализуются:

1. Исключение влияния режима работы камеры сгорания на устойчивость работы воздухозаборника;
2. Эффективное газодинамическое сжатие сверхзвукового потока перед камерой сгорания, достигаемое формированием, по терминологии [1], развитой зоны торможения в предкамерном диффузоре;
3. Согласованное функционирование сверхзвукового воздухозаборника и дозвуковой камеры сгорания в составе различных ПВРД;
4. Условия для эффективного рабочего процесса в сверхзвуковой камере двухрежимного ПВРД.

Согласно [1], [2], [3], [4], [5], в ограниченном газодинамическом канале (изоляторе) в условиях вязкого взаимодействия формируется структура, называемая псевдоскачком, переводящая сверхзвуковой поток в дозвуковой режим течения, что сопровождается ростом статического давления и термодинамически связанной с ним температуры, что фактически означает структурирование потока [6].

Эффективность термодинамического цикла силовой установки характеризуется сжатием в псевдоскачке, зависящим от режимов работы камеры сгорания и воздухозаборника. Максимально возможная степень сжатия реализуется на некоторой оптимальной длине канала, режим течения в котором характеризуется особенностями перехода сверхзвукового потока к дозвуковому режиму течения и уровнем потерь кинетической энергии [1].

Увеличение давления в псевдоскачке связано с факторами:

1. Числом Маха на входе в изолятор;
2. Закономерностью развития пограничного слоя в изоляторе и изменением формы канала изолятора, обычно определяемой углом раскрытия с целью компенсации влияния пограничного слоя на число Маха;
3. Уровнем неравномерности потока на входе в изолятор;
4. Изменением числа Рейнольдса и функционально зависящего от него гидравлического сопротивления, учитывающего характеристики турбулентности в потоке и трение на стенках канала;
5. Способом подачи горючего в проточную часть;
6. Режимом теплового и геометрического дросселирования двигателя.

В работах [4], [7], [8], [9] (подробный обзор см. [3]) рассматривались модели, с ограниченным набором экспериментальных данных. Стремление многих авторов к обобщающим выводам и более точному количественному описанию процесса сжатия в псевдоскачке приводит к разработке моделей с применением полуэмпирической теории турбулентности, различных эмпирических зависимостей при изменении

геометрии канала, интенсивности процесса дросселирования при изменении режима работы камеры сгорания.

В работах [10], [11], в отрыве от рассмотрения рабочего процесса в ПВРД, показаны моделирование структуры течения в псевдоскачке и приближенный расчет распределения статического канала вдоль зоны сжатия. При анализе характеристик структура псевдоскачка должна быть согласована с режимом работы ПВРД, а определение длины и распределение параметров в псевдоскачке должно быть основано на выполнении законов сохранения [12]. В этой работе использован баланс импульсов для структуры псевдоскачка в предположении нулевого трения на стенке для самой структуры и эмпирических зависимостей для трения до и после псевдоскачка. Общий вывод состоял в том, что точная оценка длины и распределения давления псевдоскачка возможны при детальном моделировании его структуры, однако расчеты сведены к линейной интерполяции давления вдоль стенки.

В [8], [13], [14], [15] использованы интегральные подходы к моделированию зоны сжатия. Моделирование зоны псевдоскачка выполнено введением в уравнение импульса не вполне определенных для зоны торможения коэффициентов гидравлического сопротивления [16], [17] и нарастания толщины диссипативной зоны [13], что более характерно для струйных течений.

Согласно [2] и [3], для потоков с числом Маха более 1.6 перед головной волной псевдоскачка его развитие определяется механизмом турбулентного обмена между областью псевдоскачка, областью диссипации и закономерностью развития в ней турбулентности, обеспечивающей основной вклад в производство энтропии.

Подходы к построению модели псевдоскачка с использованием аппроксимаций на основе струйной аналогии [13], либо аппроксимации Клаузера [18] для равновесных турбулентных пограничных слоев, лежащей в основе квазиодномерной отрывной модели псевдоскачка [15], в выражениях баланса сил давления и напряжения на разделительной линии, не вполне адекватны и несколько перегружены для их применения в оптимизационных расчетах характеристик ПВРД. К тому же в указанных работах использованы не вполне обоснованные согласующие коэффициенты.

Одним из требований к математическим моделям является их способность проводить большое количество параметрических расчетов [19], по результатам которых формируется предварительный облик ПВРД и дается оценка его эффективности. Данное требование направлено на обеспечение количественного результата в расчетах различных схем ПВРД и заставляет исследователей разрабатывать модель псевдоскачка без детализации внутренней структуры зоны сжатия [20], [21]. В [22] предложена «разумная идеализация» при расчете параметров псевдоскачка, которая не согласуется с экспериментальными данными [1], прямо указывающими на то, что «восстановление давления в псевдоскачке на 10%-15% ниже, чем в прямом скачке». Поэтому в расчетах характеристик ПВРД с использованием соотношений интенсивного скачка заведомо вносится ошибка в следствие возрастания потерь на трение из-за протяженности области торможения.

Данный экспериментальный факт следует учитывать для адекватного моделирования зоны развития псевдоскачка и, соответственно, для расчета

интегральных характеристик и оценки эффективности силовой установки в целом. При таком подходе использование обобщения экспериментальных данных [1], [3], [23], интегрированных в структуру модели и, как показано в данной статье, применение принципа минимального производства энтропии, определяющего характер распределения параметров вдоль зоны развития псевдоскачка, позволяют повысить адекватность расчета характеристик ПВРД. В [23] описан механизм увеличения энтропии в псевдоскачке, но определение его параметров сведено к струйной аналогии.

Таким образом, разработка новых или модификация существующих моделей псевдоскачка, позволяющих проводить большое число оптимизационных расчетов для расчета характеристик сверхзвуковой прямооточной силовой установки без введения дополнительных, зависящих от режима течения согласующих коэффициентов, остается актуальной задачей.

Модель псевдоскачка Крокко

Работы [9], [12], [13], [14], [20], [21] ссылаются на модель Крокко в качестве первой модели псевдоскачка, но ни в одной из них не приведены численные результаты ее применения. Отсутствие апробации модели авторами перечисленных работ, видимо, связано с принятием факта неадекватности результат, о котором прямо говорит Крокко, из-за не учёта трения на стенке и условия постоянства полного давления [2]. Однако бескачковая модель псевдоскачка Крокко удобна для решения задач предварительного газодинамического проектирования проточной части ПВРД

и оценки его характеристик, в виду отсутствия детального учета констант полуэмпирической теории турбулентности, неопределённых согласующих коэффициентов и необходимости моделирования детальной структуры.

Модель Крокко основана на перераспределении суммарного расхода и потока импульса между зонами диссипации, и сжатия:

уравнение расхода

$$(1 - \mu) \cdot \frac{1-w'^2}{w'} + \mu \cdot \frac{1-w''^2}{w''} = \frac{p_{xi}}{p_1} \cdot \frac{1-w_1^2}{w_1} \quad (1)$$

уравнение импульсов

$$\frac{(1-\mu)}{w'} \left(\frac{k+1}{k-1} w'^2 + 1 \right) + \frac{\mu}{w''} \left(\frac{k+1}{k-1} w''^2 + 1 \right) = \frac{1}{w_1} \left(\frac{k+1}{k-1} w_1^2 + 1 \right) \quad (2),$$

для которых должны выполняться условия $\dot{m} = \dot{m}_1$, $p = p_1$ перед псевдоскачком и $p = p_2$ после псевдоскачка. Переменные Крокко имеют вид:

$$w^2 = \frac{u_1^2}{2c_p T^*}; \quad \mu = \frac{\dot{m}''}{\dot{m}_1}; \quad 1 - \mu = \frac{\dot{m}'}{\dot{m}_1}; \quad M^2 = \frac{2}{k-1} \cdot \frac{w^2}{1-w^2},$$

где w' , \dot{m}' – скорость и расход для зоны сжатия, w'' , \dot{m}'' – скорость и расход для зоны диссипации, w_1 , \dot{m}_1 – скорость и расход для сечения перед возникновением псевдоскачка, p_1, p_2 – давления потока в сечении перед псевдоскачком и в сечении смыкания областей диссипации, k – показатель адиабаты, M – число Маха.

Модифицированная модель псевдоскачка Крокко

В МАИ, ЦИАМ, ЦАГИ, ИТПМ СОРАН и др. проведены исследования по изучению свойств потока в псевдоскачке. В работах [1], [3], [20], [21], [23], [25], [26] представлены обширные экспериментальные данные, которые целесообразно использовать в модифицированной модели Крокко.

Развитие зон диссипации и сжатия характеризуется функциями термодинамического состояния - энтропия и энтальпия. Положение псевдоскачка и его длина формируются в зависимости от режима работы воздухозаборника, камеры сгорания и сопла ПВРД. Используя дифференциальную форму второго начала термодинамики, и выражение для массовой скорости через единичную площадь при формальной замене $dt = \frac{\rho}{m} dx$, изменение энтропии s для интегральных параметров потока вдоль зоны развития псевдоскачка можно представить выражением:

$$\frac{ds}{dx} = \frac{1}{T} \left(\frac{di}{dx} - \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} \right) (3),$$

определяющим принцип функционирования любой термодинамической системы [24] - минимальное производство энтропии, анализ которой также возможен в рамках стохастического процесса [25]. Выражение (3) с использованием обобщающих экспериментальных данных потери импульса потока [1], [3] позволяет численно определить его неравновесное состояние [24], характеризуемое распределениями давлений и скоростей вдоль развитого псевдоскачка. Для такого классического случая производства энтропии, как развитие псевдоскачка учет экспериментальных данных и модификация диссипативной модели Крокко (1), (2) приводит к адекватному результату.

Модифицированная модель Крокко с использованием принципа минимального производства энтропии оценивает длину и распределение параметров вдоль псевдоскачка. Для этого необходимо иметь характеристику потери импульса вдоль псевдоскачка и обеспечить выполнение уравнений сохранения в начале и в конце зоны развития псевдоскачка по результатам термо-газодинамического расчета

проточной части [26], [27] [28] рис.1. Модифицированный и исходный вариант модели Крокко основаны на одних и тех же предположениях [2].

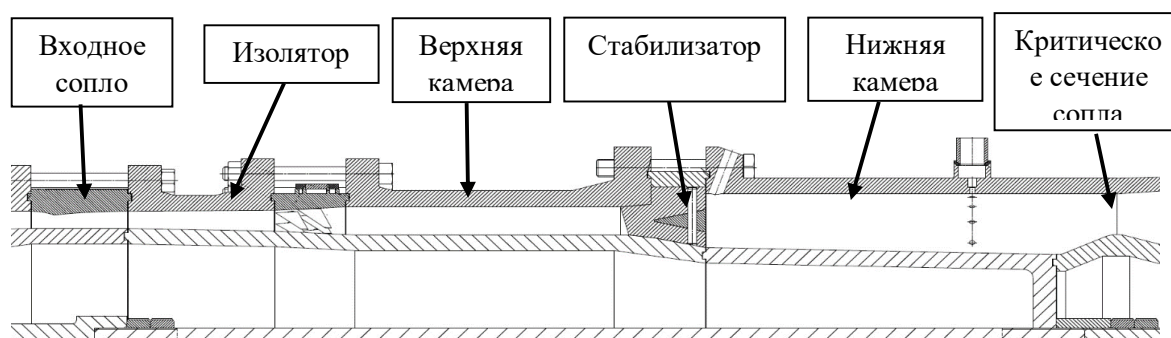


Рис. 1. Схема проточной части, характерные сечения прямооточного канала

Для учета экспериментальных характеристик в структуре модели Крокко уравнения модифицированы и дополнены:

1. уравнением изменения площади канала изолятора при изменении его угла раскрытия для компенсации влияния пограничного слоя перед псевдоскачком:

$$A_{x_i} = \pi(R_0^2 - (r_0 - x_i \cdot \operatorname{tg}\beta)^2) \quad (4)$$

где $R_0 = \text{const}$ - внешний радиус изолятора; r_0 - внутренний радиус изолятора в сечении сопряжения входного сопла и изолятора, β - угол раскрытия канала.

2. характеристикой торможения в псевдоскачке для произвольного сечения x_i через коэффициент потери импульса ξ_{x_i} потока с учетом реакции стенки

$$J_{x_i} = J_1 - \xi_{x_i} J_1 + \int_{x_1}^{x_i} p dA = (1 - \xi_{x_i}) J_1 + \int_{x_1}^{x_i} p dA \quad (5),$$

$$J_{x_i} = (\dot{m} \cdot u + p \cdot A)_{x_i} \quad (6)$$

3. уравнением энергии для зоны торможения

$$c_p T = (1 - w'^2) c_p^* T^* \quad (7)$$

4. термодинамической зависимостью параметров воздуха как функции давления и температуры, изменяющихся вдоль зоны развития псевдоскачка

$$k = f(p, T), c_p = f(p, T) \quad (8)$$

Для удобства сравнения с исходным вариантом модифицированная модель псевдоскачка записана в обозначениях переменных Крокко:

уравнение расхода

$$\frac{A_{x_i} p_{x_i}}{\dot{m}_1 \sqrt{RT^*} \sqrt{\frac{k-1}{2k}}} = (1 - \mu) \cdot \frac{1-w'^2}{w'} + \mu \cdot \frac{1-w''^2}{w''} \quad (9)$$

уравнение импульсов

$$\frac{J_{x_i}}{\dot{m}_1 \sqrt{RT^*} \sqrt{\frac{k-1}{2k}}} = (1 - \mu) \left(\frac{1-w'^2}{w'} + \frac{2k}{k-1} w' \right) + \mu \cdot \left(\frac{1-w''^2}{w''} + \frac{2k}{k-1} w'' \right) \quad (10)$$

Для решения системы уравнений необходимо вдоль зоны развития псевдоскачка задать распределение давления, которое можно аппроксимировать ортогональным разложением Лаггера $p(x) = \sum_{j=0}^k b_j \cdot l_j(x)$, $x = [0, \infty)$, где коэффициенты b_j определяются численным решением вариационной задачи о минимуме производства энтропии. x_1 - сечение возникновения псевдоскачка, x_2 - сечение максимального давления в псевдоскачке, J_1 - импульс потока в сечении x_1 , J_{x_i} - импульс потока в произвольном сечении x_i .

Экспериментальные характеристики, используемые в модифицированной модели Крокко

В уравнении (10), следуя выводам работы [3], «учет силы трения на развитие диссипативных процессов в зоне развития псевдоскачка целесообразно выполнять,

используя коэффициент потери входного импульса потока $\xi_{xi} = f\left(M_1, \left(x_i/D_{hyd}\right)\right)\gg$

в виде характеристики торможения вдоль зоны развития псевдоскачка (рис. 2).

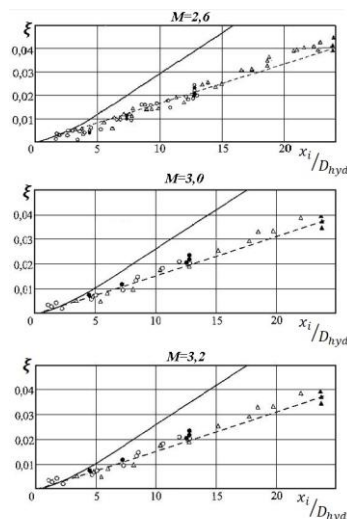


Рис. 2. Характеристика потерь в псевдоскачке для различных чисел Маха.

D_{hyd} - гидравлический диаметр канала, ξ - коэффициент потери входного импульса потока.

Для верификации модели псевдоскачка (3) - (10) использовались обобщенные характеристики статистической длины (рис. 3) и распределения давления (рис.4).

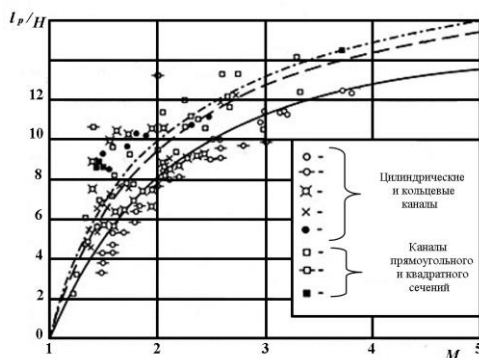


Рис. 3. Обобщенная характеристика статистической длины псевдоскачка

$$\bar{l}_p = l_p/H = \frac{4k}{k-1} \frac{M^2-1}{M^2} \left(\frac{\delta}{0.5(D-d)} \right)^{0.125}$$

где δ - толщина пограничного слоя перед псевдоскачком, D - внешний диаметр канала, d - внутренний диаметр канала, l_p – длина псевдоскачка, $H = (D - d)$ - высота канала.

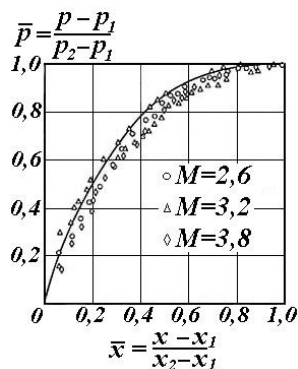


Рис. 4. Обобщенная характеристика распределения давления в псевдоскачке

$$\bar{p}^* = 3\bar{x} - 3\bar{x}^2 + \bar{x}^3$$

Экспериментальная модель прямого канала

Для верификации модифицированной модели псевдоскачка Крокко использовались экспериментальные данные, полученные при стендовых испытаниях модельной камеры двухрежимного ПВРД с предкамерным диффузором рис.1. Массовое содержание кислорода на входе предкамерного диффузора соответствовало его содержанию в атмосфере. Числа Маха, расходы и давления на входе в предкамерный диффузор соответствовали расчетным данным воздухозаборника на заданный диапазон скоростей путем задания σ – коэффициента восстановления полного давления и φ - коэффициента расхода.

Выбор схемы проточной части основан на следующих положениях:

- псевдоскачок рассматривается, как газодинамическая структура, положение и параметры которой связаны с рабочим процессом двигателя;

- расчетным режимом течения в изоляторе является режим полностью развитого псевдоскачка, соответствующий наиболее устойчивому режиму работы силовой установки при максимальной степени повышения статического давления;

- условия возникновения и устойчивости уstructures псевдоскачка гарантируются для вполне определенных типов каналов и реализуемых в них режимов течения согласно экспериментальным данным [1]. Рисунок 5 показывает статистические данные, определяющие возникновение головной волны псевдоскачка как функции относительной ширины канала $\bar{b} = F/P^2$, при определенном значении которого вдоль периметра канала формируется пограничный слой с минимальной неравномерностью потока. F - площадь сечения, P - периметр канала.

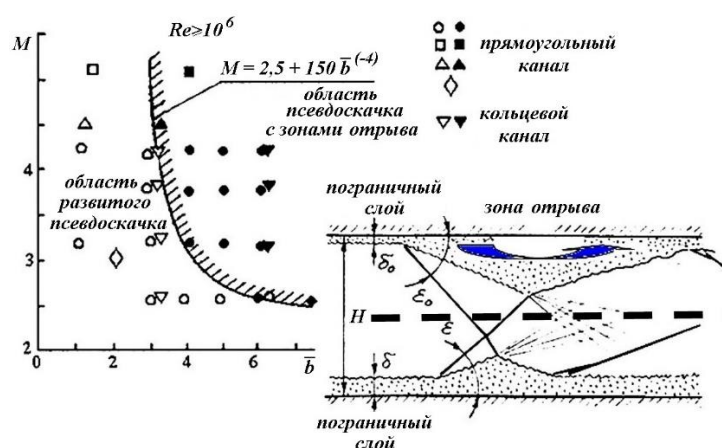


Рис. 5. Области возникновения псевдоскачка.

Пунктирной линией показана граница, отделяющая полностью развитый псевдоскачок (область диссипации у нижней стенки) от псевдоскачка с обширной зоной отрыва (область диссипации у верхней стенки).

Изменения в структуре псевдоскачка зависят от противодавления в камере сгорания, числа Маха на входе в изолятор и режима течения, характеризуемого

числом Рейнольдса. При проектировании ПВРД расчетный режим работы должен выбираться из условия невыхода структуры псевдоскачка за пределы, связанные с газодинамическими ограничениями для воздухозаборника и камеры сгорания.

Согласно данным [1] для экспериментальной модели двухрежимной камеры сгорания геометрические характеристики и режим работы изолятора соответствовали области развитого псевдоскачка (рис.5):

$3 < \bar{b} < 50$; $Re \approx (6 \div 8) \cdot 10^6$; $D_{hyd} \approx 40$; диапазон чисел Маха = $(1.6 \div 3.0)$ на входе в канал.

Статистические данные позволяют обоснованно выбрать предварительную геометрию изолятора из условия гарантированного возникновения развитого псевдоскачка. Расположение же псевдоскачка и распределение давления в нем должно быть оптимизировано на основе математической модели (3) - (10). Предкамерный диффузор имел угол раскрытия нижней стенки в пределах 2 градусов (обеспечение условия постоянства числа Маха перед головной волной сжатия псевдоскачка).

В [1], [3] показано, что сформированный после псевдоскачка дозвуковой поток по своим свойствам одномерен за счет механизма торможения в псевдоскачке. Поэтому частичное перемешивание подаваемого в проточную часть горючего выполняется в структурах псевдоскачка [28], позволяя выполнить предварительную подготовку топливо-воздушной смеси на входе в камеру сгорания и реализовать практически гомогенную смесь для достижения наибольшей эффективности горения.

Результаты расчетов и их сравнение с экспериментальными данными

Подход к моделированию заключается в том, чтобы, используя модифицированную модель Крокко и характеристики торможения потока вдоль зоны развития псевдоскачка, в которой распределение давления определяется из условия минимального производства энтропии, найти распределение скорости, давления и температуры для построения согласованного решения между правой и левой границами псевдоскачка, параметры в которых предварительно определены расчетом режимов работы камеры сгорания и воздухозаборника.

Для рассматриваемых режимов по числу Маха в виду применения методов оптимизации следует выбрать начальное приближение длины псевдоскачка (рис. 3). Данные, необходимые для этого соотношения, можно получить, используя методики моделирования развития пограничного слоя, рассмотренные в [9], [18], [20], [21].

Для получения решения система уравнений модифицированной модели Крокко (3)-(10) должна удовлетворять следующему условию: число Маха дозвукового потока должно быть равно 1.0 при смыкании областей диссипации, что выполняется при условии на границах псевдоскачка:

Слева перед псевдоскачком в сечении x_1 : $w' = w_{M_1 > 0}$; $p_{x_i=x_1} = p_1$; $\mu = 0$,

Справа после псевдоскачка в сечении x_2 : $w' = w_{M=1}$; $p_{x_i=x_2} = p_2$; $\mu = 1$.

Положение псевдоскачка и соответствующие этому положению координаты x_1 и x_2 определяются из баланса импульсов(10), которое совместно с уравнением баланса расходов (9) позволяет найти значения давлений p_1 и p_2 , согласованные с

газодинамическим расчетом проточной части силовой установки, т.е. $p(x_1) = p_1$, $p(x_2) = p_2$.

Распределение давления в зоне псевдоскачка, представленное ортогональным разложением Лаггера, достаточно просто позволяет аналитически оценивать изменение производной давления, используемой в выражении производства энтропии. Для повышения скорости вычислений и обеспечения лучшей сходимости численного решения вариационной задачи были использованы достаточно адекватные реальному процессу дополнительные условия:

$$\frac{dp(x_2)}{dx} = 0 \quad (11)$$

$$\frac{d^2p(x_2)}{dx^2} = 0 \quad (12).$$

С целью получения более точной оценки распределения давления вдоль зоны развития псевдоскачка в уравнении энергии возможен учет теплового потока [29] в стенку через температурный фактор по асимптотической теории турбулентного пограничного слоя [30].

Верификация вычисленного распределения давления вдоль псевдоскачка с использованием принципа минимума производства энтропии проводилась сравнением с экспериментальной зависимостью $\bar{p}^* = 3\bar{x} - 3\bar{x}^2 +$

\bar{x}^3 (рис.4). Получаемые численные решения приводились к виду $\bar{p} = f(\bar{x})$; $\bar{p} = \frac{p-p_1}{p_2-p_1}$;

$\bar{x} = \frac{x-x_1}{x_2-x_1}$ для чисел Маха $M=3.5$; 4.0 ; 5.0 . Рисунок 6 показывает решения

вариационной задачи - производство энтропии как функции среднеквадратичного

отклонения распределений давления вдоль зоны развития псевдоскачка $\bar{p}(\bar{x}_i)$ от статистической зависимости $\bar{p}^*(\bar{x}_i)$ (рис.4):

$$\Phi = \sum_{i=1}^N (\bar{p}^*(\bar{x}_i) - \bar{p}(\bar{x}_i))^2$$

N – количество точек в распределении давления вдоль зоны развития псевдоскачка.

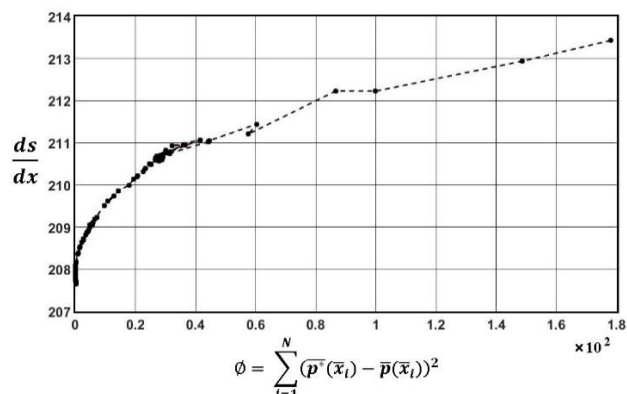
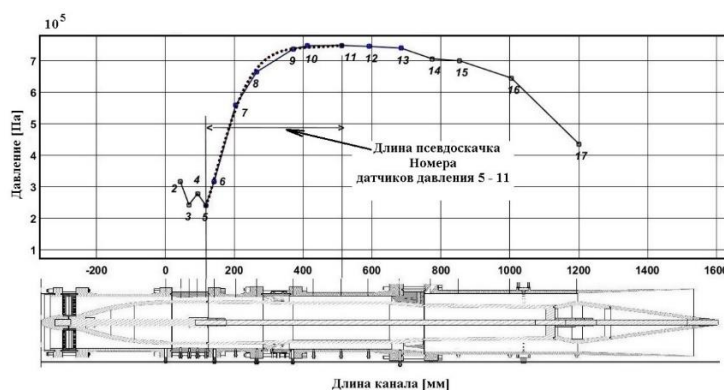


Рис. 6. Изменение производства энтропии в функции отклонения решения по модифицированной модели Крокко от экспериментальной зависимости (рис.4)

На рисунках 7 а,б,с для режимов полетных чисел Маха 3.5, 4.0, 5.0 показано сравнение численного расчета и экспериментального результата в абсолютных значениях давления вдоль проточной части экспериментальной модели.



а

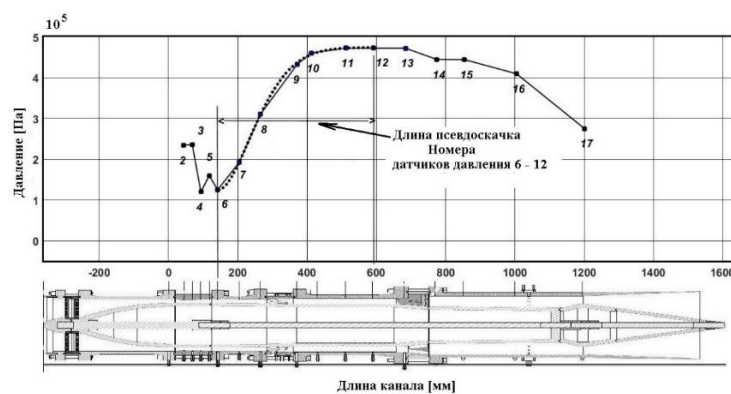
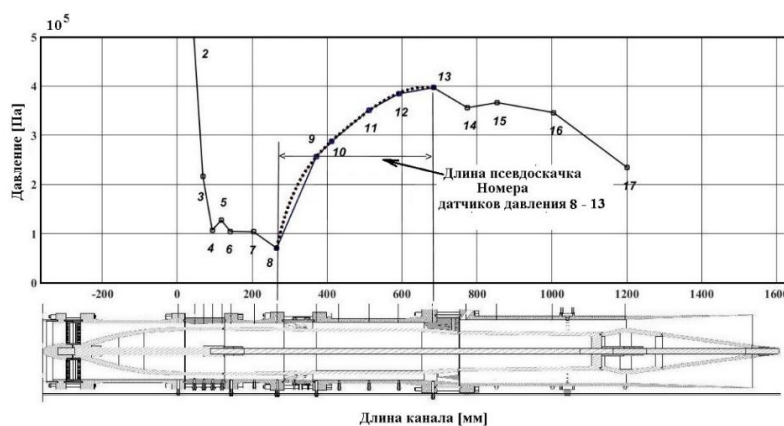
**b****c**

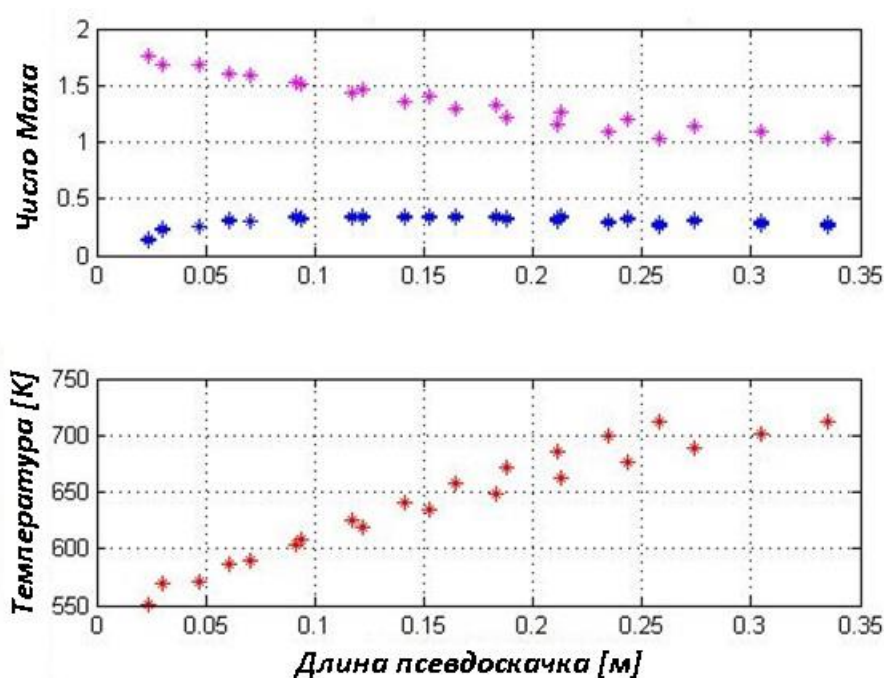
Рис. 7. Сравнение результатов моделирования распределения давления в псевдоскачке с экспериментальными данными.

Расчет зоны развития псевдоскачка показан пунктирной линией. Сплошной линией показан расчет статического давления вдоль двухрежимной камеры сгорания экспериментальной модели и перед головной волной псевдоскачка. Точками нанесены данные измерений. Видно некоторое отличие экспериментальных данных и модифицированной модели Крокко при достаточном для расчетов количественном соответствии. Расхождение результатов можно объяснить отсутствием в модели учета производства энтропии в структуре псевдоскачка и влияния тепло-массообменных процессов вдоль зоны диссипации из-за кратковременности

проводимых экспериментов. В таком контексте результаты моделирования подтверждают вывод работ [10] и [12] о необходимости учета детализации структуры псевдоскачка для более точной оценки распределения давления. Адекватность методики была также проверена в процессе предварительных испытаний двухрежимного ПВРД [31] и в расчетах характеристик ПВРД [32].

Для всех полетных режимов $M=3.5$; 4.0; 5.0 (рис.8 а, б, с) модифицированная модель Крокко показывает снижение чисел Маха до 1.0 в зоне развития псевдоскачка, что согласуется с экспериментальными данными [3] изменения скорости в диссипативной зоне (рис 9),

а. $M=3.5$



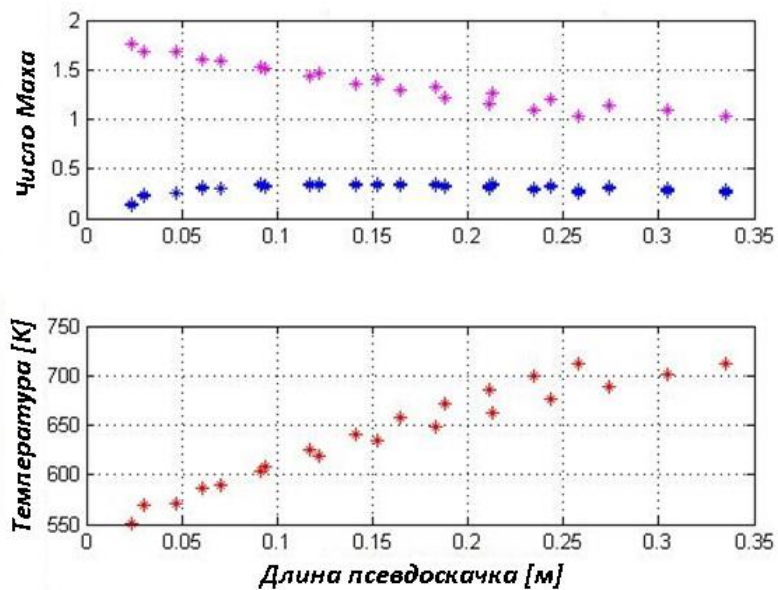
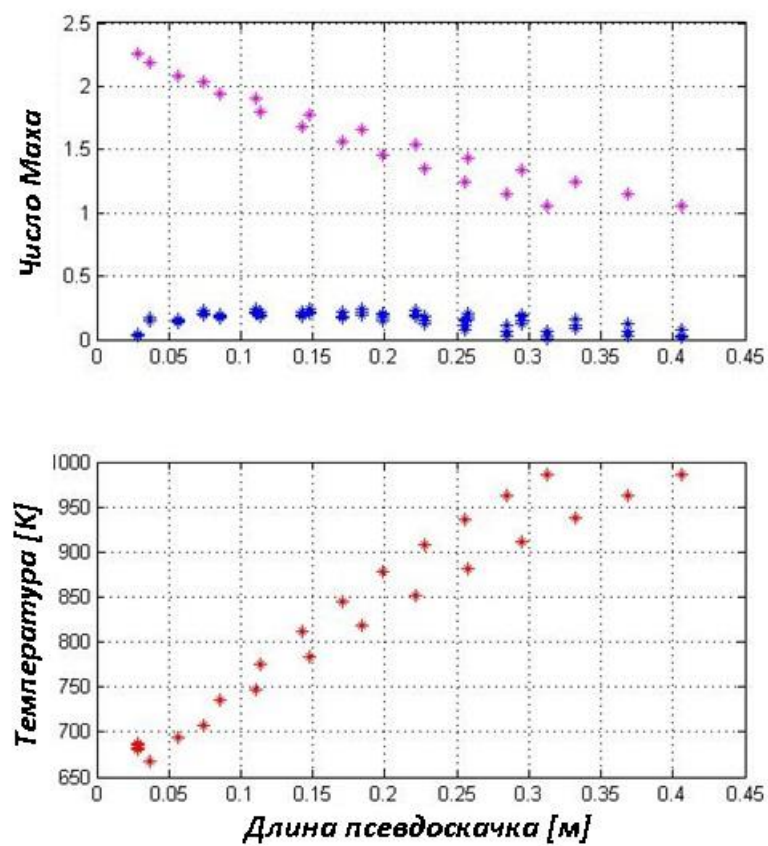
в. М=4.0**с. М=5.0**

Рис. 8.

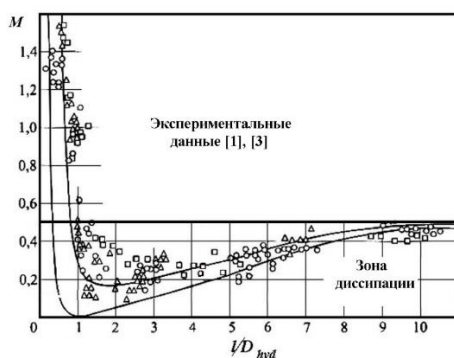


Рис. 9.

Сравнение исходной и модифицированной моделей псевдоскачка

Исходная модель Крокко использует условие постоянства полного давления $p^* =$

$const$, что означает $\frac{p_{xi}}{p_1} = \left(\frac{1-w'^2}{1-w_1^2}\right)^{\frac{k}{k-1}}$. Именно это предположение не дает адекватного

результата в исходной модели Крокко из-за чего решение [2] для зоны сжатия сходится к значениям $M > 2.0 \div 2.5$ в сечении смыкания слоев диссипации. Из физических соображений число Маха должно приближаться к 1.0 в зоне смыкания слоев диссипации, что и обеспечивает модификация диссипативной модели псевдоскачка Крокко, которая может быть применена для оптимизационных исследований перспективных двигателей [33].

Рисунок 10 показывает сравнение распределений, получаемых на основе исходной и модифицированной моделей Крокко, как пример, для полетного числа Маха =5.0 на входе в изолятор. Видно, что модифицированная модель псевдоскачка Крокко позволяет достичь адекватных результатов при расчете зоны сжатия в изоляторе с использованием дополнительных соотношений и экспериментальных характеристик. При этом исходная модель Крокко дает необъяснимый результат для изменения средней скорости в зоне сжатия.



Рис. 10. Сравнение исходной и модифицированной моделей Крокко.

Выводы:

1. Результат модифицированной модели Крокко согласуется с обобщающими экспериментальными данными.
2. Показано, что приближение расчетного распределения давления вдоль псевдоскачка к обобщающей экспериментальной зависимости характеризуется минимальным значением производства энтропии.
3. Модифицированная модель Крокко применима для термодинамического расчета цикла ПВРД и оценки его эффективности на основе принципа минимума производства энтропии.
4. Расхождение экспериментальных данных и моделирования можно объяснить не учетом процессов производства энтропии и влияния тепло-массообменных процессов на изменение параметров в структуре псевдоскачка.
5. Полученный уровень расхождения результата моделирования и экспериментальных данных свидетельствует в пользу того, что значительный прирост энтропии связан с областью диссипации.

Библиографический список

1. Пензин В.И. Экспериментальное исследование отрывных течений в каналах. – М.: Изд-во ЦАГИ, 2009. – 280 с.
2. Крокко Л. Одномерное рассмотрение газовой динамики установившихся течений. Кн. Основы газовой динамики / Под ред. Г. Эммонс. - М.: Изд-во Иностранной литературы, 1963. – 702 с.
3. Гуськов О.В., Копченков В.И., Липатов И.И. и др. Процессы торможения сверхзвуковых течений в каналах. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 168 с.
4. Waltrup P.J., Billig F.S. Structure of Shock Waves in Cylindrical Ducts // AIAA Journal, 1973, vol. 11, no. 10, pp. 1404 – 1408. DOI:<http://dx.doi.org/10.2514/3.50600>
5. Waltrup P.J., Billig F.S. Prediction of Precombustion Wall Pressure Distributions in Scramjet Engines // Journal of Spacecraft, 1973, vol. 10, no. 9, pp. 620 - 622. DOI:[10.2514/3.27782](http://dx.doi.org/10.2514/3.27782)
6. Щербаков М.А., Марчуков Е.Ю., Картовицкий Л.Л. Вихревое структурирование газового потока в компрессорной решетке // Труды МАИ. 2010. № 41. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=23816>
7. Гимранов Э.Г. Газодинамика торможения вязкого сверхзвукового потока в «туннельном» входном устройстве ракетно-прямоточного двигателя // Вестник УГАТУ. 2006. Т. 7. № 2 (15). С. 61 - 70.
8. Гурылев В.Г., Елисеев С.Н. К теории «псевдоскачка» на входном участке канала // Ученые записки ЦАГИ. 1972. Т. 3. № 3. С. 25 – 35.

9. Гогиш Л.В., Степанов Г.Ю. Квазиодномерная теория взаимодействия турбулентного следа со сверхзвуковым потоком в канале и струе // Труды Института механики МГУ. 1971. № 11.
10. Azevedo D.J., Liu C.S. Engineering approach to the prediction of shock patterns in bounded high-speed flows // AIAA, 1993, vol. 31, no. 1, pp. 83 - 90. DOI:[10.2514/3.11321](https://doi.org/10.2514/3.11321)
11. Медведев А.Е. Приближенное моделирование структуры течения в λ -образном псевдоскачке // Прикладная механика и техническая физика. 2014. Т. 55. № 6. С. 43 - 59.
12. Takeshi K. Prediction of Pseudo-Shock Position in a Long Duct Using the Momentum Balance Model // Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, 2012, vol. 55, no. 3, pp. 199 - 201. DOI: [10.2322/tjsass.55.199](https://doi.org/10.2322/tjsass.55.199)
13. Зимонт В.Л., Левин В.М., Мещеряков Е.А. Горение водорода в сверхзвуковом потоке в канале при наличии псевдоскачка // Физика горения и взрыва. 1978. Т. 14. № 4. С. 23 – 36.
14. Гимранов Э.Г. Торможение вязкого сверхзвукового потока («псевдоскачок») в каналах двигателей летательных аппаратов: сборник трудов УАИ. – Уфа: УГАТУ, 1992. Ч. I. С. 121 - 132.
15. Мещеряков Е.А., Яшина В.В. Квазиодномерная отрывная модель псевдоскачка в канале // Учёные записки ЦАГИ. 2013. Т. XLIV. № 5. С. 46 - 63.
16. Гимранов Э.Г., Михайлов В.Г. Обобщенные квазиодномерные уравнения движения газа в каналах ДЛА и их интегралы // Вестник УГАТУ. 2006. Т. 7. № 1 (14). С. 153 - 160.

17. Гимранов Э.Г. Развитие метода Крокко для решения обобщенных уравнений движения газа в каналах ДЛА и ЭУ // Вестник УГАТУ. 2007. Т. 9. № 1 (19). С. 3 - 7.
18. Лапин Ю.В. Турбулентный пограничный слой в сверхзвуковых потоках газа. - М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982. – 312 с.
19. Александров В.Н., Быцкевич В.М., Верховоломов В.К. и др. Интегральные прямоточные воздушно-реактивные двигатели на твердых топливах. Основы теории и расчета / Под ред. Л.С. Яновского. - М.: Академкнига, 2006. - 343 с.
20. Tamaki T. Tomita Y. Yamane R. A study of pseudo-shock: 1st Report, λ -type pseudo-shock // Bulletin JSME, 1970, vol. 13, no. 55, pp. 51 – 58. DOI: <http://dx.doi.org/10.1299/jsme1958.13.51>
21. Tamaki T. Tomita Y. Yamane R. A study of pseudo-shock: 2nd Report, x -type pseudo-shock // Bulletin JSME, 1971, vol. 14, no. 74, pp. 807 – 817. DOI: <https://doi.org/10.1299/jsme1958.14.807>
22. Гунько Ю.П., Шумский В.В. Характеристики прямоточных воздушно-реактивных двигателей с двухрежимной камерой сгорания // Теплофизика и аэромеханика. 2014. Т. 21. № 4. С. 521 - 530.
23. Зимонт В.Л., Острась В.Н. Расчет псевдоскачка в цилиндрическом канале // Ученые записки ЦАГИ. 1974. Т. V. № 3. С. 40 – 48.
24. Пригожин И. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур. - М.: Мир, 2008. - 464 с.
25. Хатунцева О.Н. О механизме возникновения в стохастических процессах гауссовских распределений случайной величины с «тяжелыми» степенными

«хвостами» // Труды МАИ. 2018. № 102. URL:

<http://trudymai.ru/published.php?ID=98854>

26. Левин В.М. Проблемы организации рабочего процесса в ПВРД // Физика горения и взрыва. 2010. Т. 46. № 4. С. 45 - 55.

27. Левин В.М., Карасев В.Н., Картовицкий Л.Л. и др. Нестационарность процесса в модели ПВРД // Физика горения и взрыва. 2013. Т. 49. № 6. С. 68 - 75.

28. Левин В.М., Карасев В.Н., Картовицкий Л.Л. Вопросы организации рабочего процесса в камере сгорания ПВРД // Вестник Московского авиационного института. 2009. Т. 16. № 5. С. 78 - 87.

29. Багдасарян Г.Е., Микилян М.А., Варданян И.А., Пантелеев А.В. Замкнутая цилиндрическая оболочка в сверхзвуковом потоке газа в присутствии неоднородного температурного поля // Труды МАИ. 2018. № 103. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=100822>

30. Кутателадзе С.С, Леонтьев А.И. Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое. - М.: Энергия, 1972. – 342 с.

31. Левин В.М., Карасев В.Н., Картовицкий Л.Л. и др. Результаты предварительных испытаний двухрежимного ПВРД // Труды ЦАГИ. 2015. № 2736. С. 28 - 34.

32. Карасев В.Н., Левин В.М. Моделирование тяговых характеристик прямоточного воздушно-реактивного двигателя для больших сверхзвуковых скоростей полета // Труды МАИ. 2013. № 64. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=36551>

33. Эзрохи Ю.А., Дрыгин А.С., Кизеев И.С., Селиванов О.Д., Фокин Д.Б.

Перспективы применения технологии третьего контура в условиях сверхзвукового

полета // Труды МАИ. 2016. № 99. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=91846>