

УДК 53, 536.3, 519.6

О проблемах моделирования газодинамических течений в поршневой газодинамической установке для отработки изделий ракетно-космической техники

В.В. Кислых, Н.Ф. Кудимов, А.В. Панасенко, О.Н. Третьякова

Аннотация

В статье приведены постановка задачи и результаты численного моделирования процессов в поршневой газодинамической установке, предназначенной для получения гиперзвукового потока модельного газа для отработки изделий ракетно-космической техники. Проведено сравнение полученных результатов численного моделирования с результатами эксперимента.

Ключевые слова: газодинамическая установка, численное моделирование, уравнения Навье-Стокса.

Введение

Из многолетнего опыта создания изделий ракетно-космической техники следует необходимость постоянного совершенствования методов экспериментальных и теоретических исследований для определения в наземных условиях характеристик ракетно-космической техники по части тепломассообмена, аэрогазодинамики, обеспечивающих математическое и имитационное моделирование процессов функционирования. Это совершенствование происходит одновременно с разработками перспективных и модернизацией существующих ракет-носителей (РН) и космических аппаратов (КА) для решения новых, более сложных задач исследования космического пространства, что требует переоценки взглядов на оптимальное соотношение расходов, обеспечивающих выполнение отдельных видов наземной отработки, в том числе с использованием математического моделирования. В этой связи возрастает роль математического и имитационного моделирования, которое способствует сокращению расходов на экспериментальную отработку изделий ракетно-космической техники.

Экспериментальная поршневая газодинамическая установка (ПГУ) предназначена для получения гиперзвукового потока газа для отработки изделий ракетно-космической техники. В статье приведены постановка задачи и результаты численного моделирования

процессов в поршневой газодинамической установке для получения картин течения газа. С этой целью была разработана методика решения двух взаимосвязанных физических задач – движения поршня и нестационарного течения газа в стволе ПГУ. Расчет газодинамического нестационарного процесса является нестандартным из-за наличия ускоряющегося поршня, который является левой границей расчетной области. Особенностью разработанной методики является алгоритмическое ограничение расчетной области газодинамического процесса со стороны поршня, путем исключения из расчета участка области, которую прошел поршень. Реализован алгоритм параллельных вычислений с использованием технологии *Message Passing Interface (MPI)* для расчета задачи на многопроцессорных вычислительных системах. Проведено сравнение полученных результатов численного моделирования с результатами эксперимента.

Исследование термогазодинамических процессов в поршневой газодинамической установке в условиях конвективного теплопереноса

Поршневая газодинамическая установка (ПГУ) обеспечивает отработку в наземных условиях, максимально приближенных к натурным, на крупномасштабных моделях различных летательных аппаратов, перспективных воздушно-космических систем и их элементов. Поршневая газодинамическая установка относится к классу импульсных труб (ИТ). Она включает в себя установку со свободным поршнем (СПУ), форкамеру с одной удлиненной или несколькими камерами а также запорно-пусковой клапан (ЗПК). В свою очередь СПУ состоит из баллона с толкающим газом (азот, воздух) объемом V_{IT} и поршневого импульсного компрессора (ПИК) – ствола объемом V_{IC} с модельным газом с давлением P_1 и температурой T_1 .

Схематично исследуемая часть установки представлена на рис. 1.

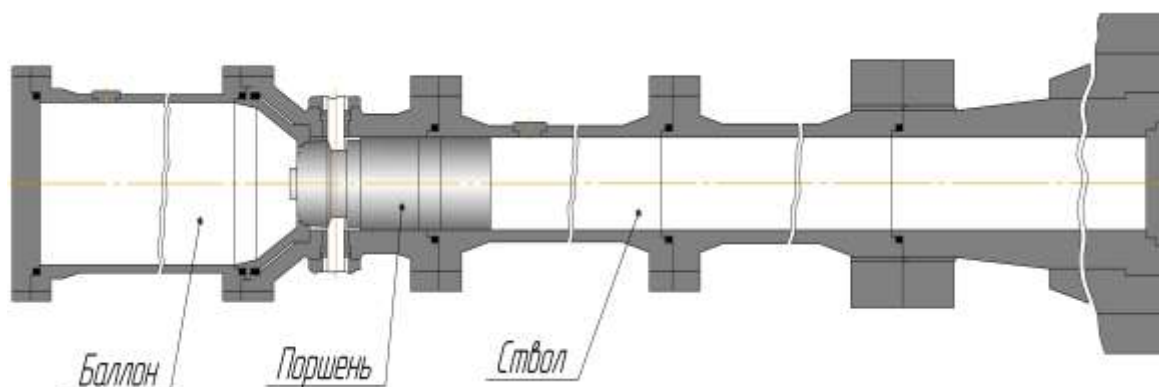


Рис. 1. Установка со свободным поршнем

Источником внешней энергии в ПГУ служит толкающий газ высокого давления (воздух, азот), аккумулированный в баллоне установки со свободным поршнем при давлении до 300 бар.

Перед экспериментом поршень удерживается специальным механизмом (кlyкoвый механизм) в начале ствола, перекрывая отверстие, связывающее баллон со стволом и, таким образом, удерживая толкающий газ в баллоне.

В ствол установки перед экспериментом подается модельный газ. Начальный уровень его давления составляет $\sim (1-20)$ бар.

Подвод механической энергии к модельному газу начинается с момента освобождения поршня и начала его движения вдоль ствола. Под действием толкающего газа поршень ускоряется, при этом в сжимаемом модельном газе происходит повышение давления и температуры.

После выравнивания уровня давлений толкающего и сжимаемого газов поршень продолжает движение за счет аккумулированной в нем кинетической энергии до полной его остановки, после чего, под действием давления сжатого модельного газа поршень начинает движение в обратном направлении.

Преобразование механической энергии в тепловую энергию модельного газа, с целью повышения температуры, производится с использованием технологий, основанных на высокоэффективном методе преобразования механической энергии сжатых газов в их тепловую энергию, называемом (МКС-методом) методом многокаскадного сжатия [1].

В настоящее время существует приближенное рассмотрение процесса сжатия газа в ПГУ, основанное на упрощенном его рассмотрении в одномерном приближении без учета эффектов вязкости, теплопроводности и в предположении адиабатичности процесса. В действительности процессы, протекающие в ПГУ при сжатии модельного газа, существенно сложнее. Даже относительно небольшие тепловые потери оказывают существенное влияние на динамику торможения поршня у передней торцевой стенки ствола. Кроме того, интересен процесс срезания поршнем охлажденного пограничного слоя, образующегося из-за взаимодействия холодных стенок ствола с движущимся высокотемпературным модельным газом.

На данный момент существующие методы расчета базируются на термодинамическом приближении. В работе была предпринята попытка исследования возникающих картин течения газа в рамках решения нестационарных уравнений Навье-Стокса.

Математическое моделирование течения газа

Разработанная в ходе выполнения работы методика расчета сводится к решению двух взаимосвязанных различных по своей физической природе задач:

Задача 1 – расчет динамики движения поршня;

Задача 2 – расчет газодинамического нестационарного процесса течения модельного газа в стволе ПИК;

Задача 1 сводится к интегрированию методом Рунге-Кутты 4-го порядка на каждом временном шаге газодинамической задачи системы уравнений

$$\begin{cases} M \frac{dV}{dt} = S(P_b - P_p) - F_v \\ \frac{dX}{dt} = V \end{cases}, \quad (1)$$

где V - текущая скорость поршня, X - координата поршня, P_b - величины толкающего давления, P_p - давление на поршень со стороны сжимаемого им газа, M – масса поршня, S – площадь поверхности поршня, F_v – сила трения поршня о поверхность ствола ПГУ.

При этом на каждом временном шаге газодинамической задачи производится решение задачи о движении поршня от начальных условий, соответствующих моменту времени t , в которых задаются текущая скорость поршня V и его X -координата, до момента времени $t+dt$ (dt – текущий шаг газодинамической задачи). При этом учитывается уменьшение со временем величины толкающего давления P_b (берется из соображений адиабатического расширения объема толкающего газа) и текущее изменение давления на поршне со стороны сжимаемого им газа P_p (берется из решения газодинамической задачи).

Задача 2 - расчет газодинамического нестационарного процесса в стволе ПГУ. Данная задача является нестандартной вследствие наличия ускоряющегося поршня, который является левой границей расчетной области, и неподвижной правой границы.

Расчет проводится в рамках уравнений Навье-Стокса:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial}{\partial t} \left(\iiint_{\Omega} \rho \cdot d\Omega \right) + \iint_S \rho \cdot v_j dS_j &= 0 \\
\frac{\partial}{\partial t} \left(\iiint_{\Omega} \rho \cdot v_k \cdot d\Omega \right) + \iint_S (\rho v_k v_j + \delta_{jk} P - \tau_{jk}) dS_j &= 0 \\
\frac{\partial}{\partial t} \left(\iiint_{\Omega} E \cdot d\Omega \right) + \iint_S \left[\left(h + \frac{1}{2} \cdot v_j v_j \right) \rho v_j - \lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} - \tau_{jk} v_k \right] dS_j &= 0
\end{aligned} \tag{2}$$

Особенностью метода расчета является алгоритмическое ограничение расчетной области газодинамического процесса со стороны поршня, путем исключения из расчета участка области, которую прошел поршень. В результате расчет проводится в неподвижной системе координат, связанной с установкой. На каждом временном шаге расчет потоков на левой границе проводится в 3 этапа: 1) проводится пересчет параметров в прилегающей к поршню ячейке в мгновенную систему координат, связанную с поршнем; 2) проводится расчет отражения потока от неподвижной стенки (распад разрыва); 3) проводится обратный пересчет параметров в прилегающей к поршню ячейке в лабораторную систему координат. После чего проводится расчет параметров газа в ячейках расчетной области методом Мак-Кормака [2] для конвективных членов. Диссипативные члены аппроксимируются центральными разностями [3].

Численная реализация системы уравнений Навье-Стокса проводится на основе метода конечных объемов. При проведении расчетов в качестве характерных масштабов приняты: $[x],[y]=1$ м, $[P]=101325$ Н/м², $[\rho]=1.293$ кг/м³, $[T]=300$ К, $[v]=\sqrt{P/\rho}$ м/с.

Проведенные расчеты показывают, что поршень в своем движении разгоняет газ посредством возникающих волн сжатия. Волны сжатия добегают до стенки, отражаются от нее, отраженные волны сталкиваются с набегающими, что приводит к многократному периодическому повышению – понижению давления по длине ПГУ. Ниже приведены фрагменты нестационарного процесса, иллюстрирующие сказанное. На рис. 2-8 представлена визуализация полученных расчетов, где по горизонтальной оси отложена координата x , по вертикальной оси – координата y , значения величин определяются палитрой цветов от красного (максимального значения) до синего (минимального значения).

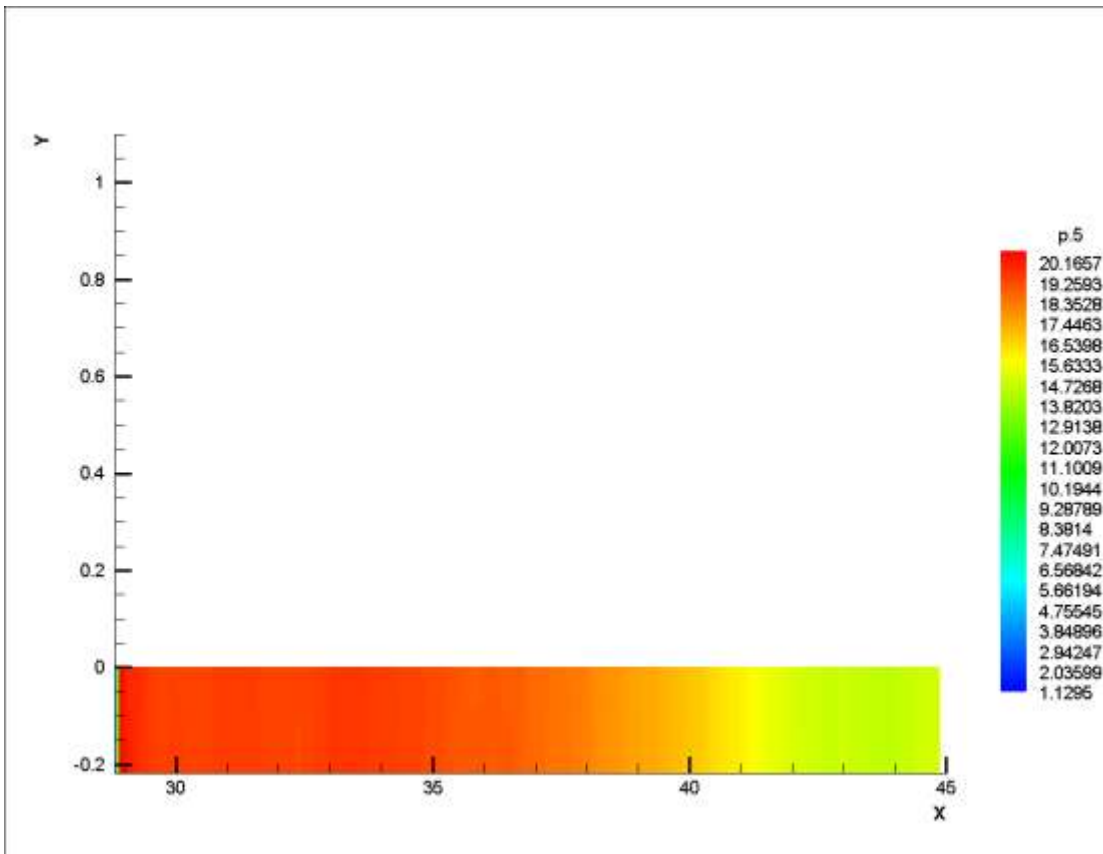


Рис. 2. Безразмерное поле давления в момент времени $t=0.2712$ с

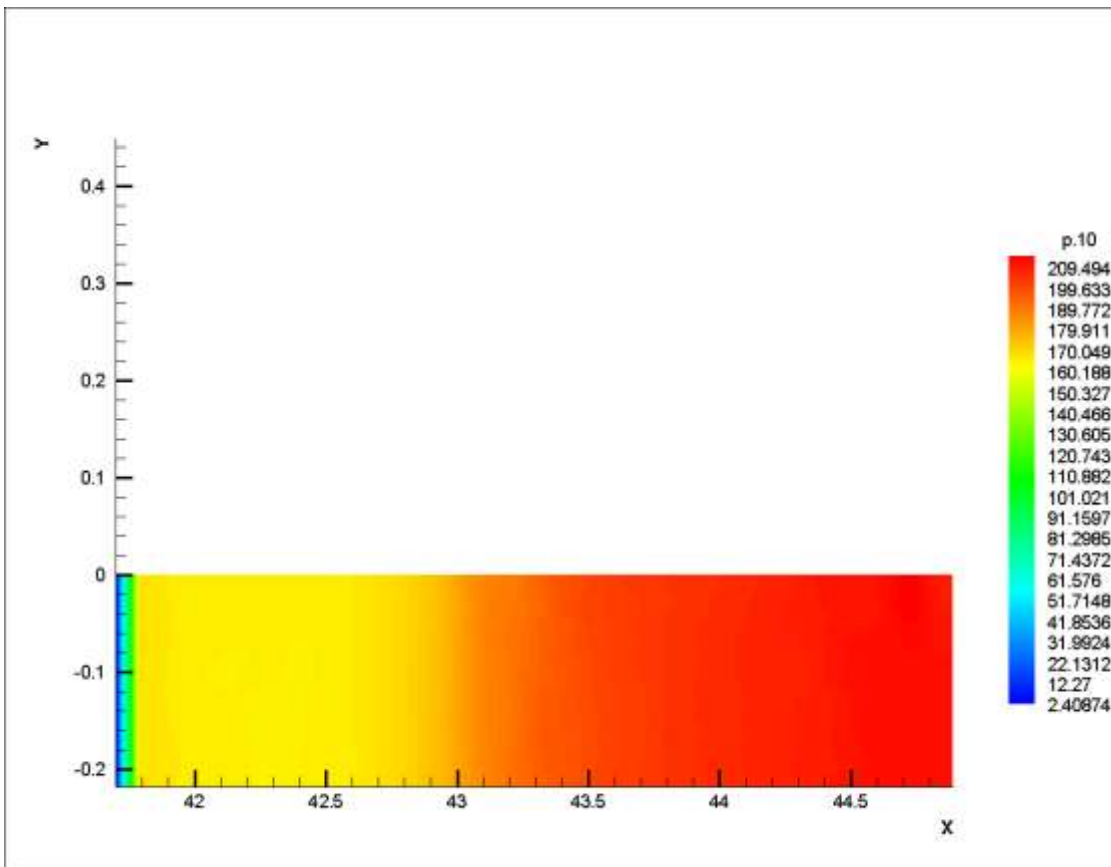


Рис. 3. Безразмерное поле давления в момент времени $t=0.3467$ с

На Рис. 4-5 представлены поля температуры.

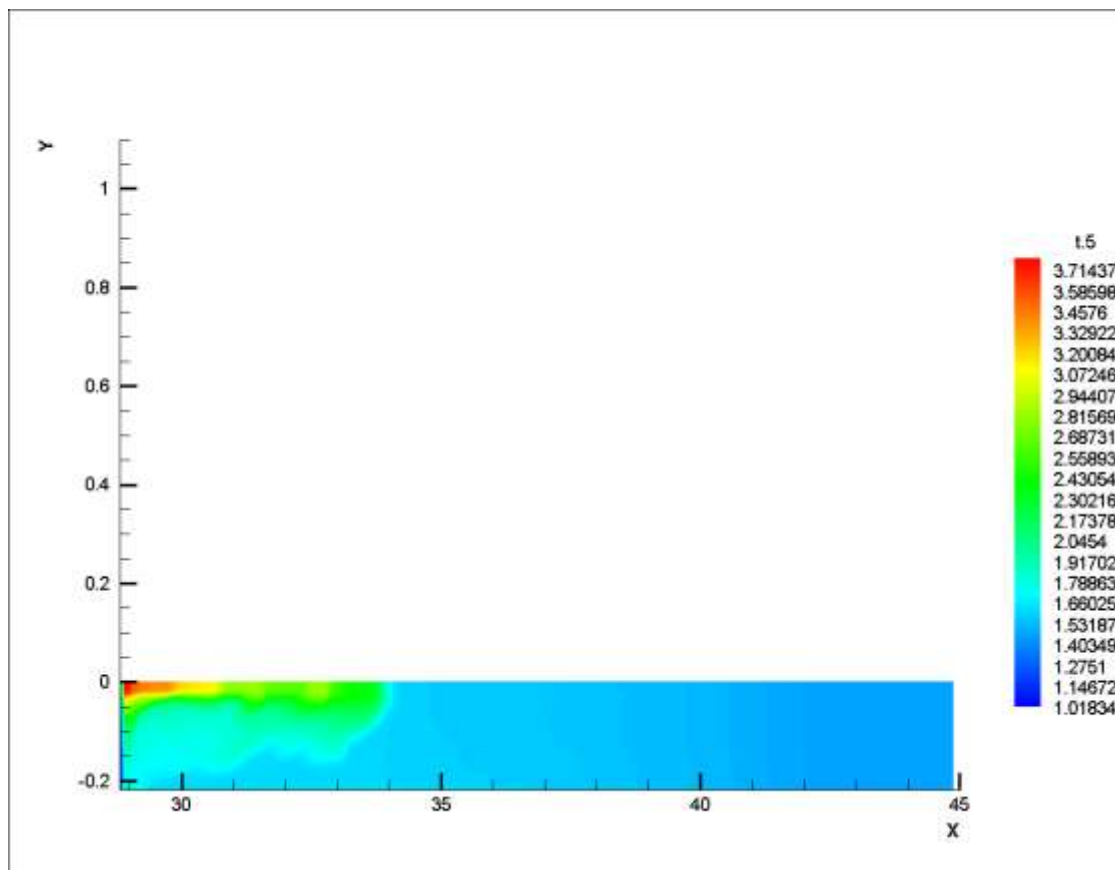


Рис. 4. Безразмерное поле температуры в момент времени $t=0.2712$ с

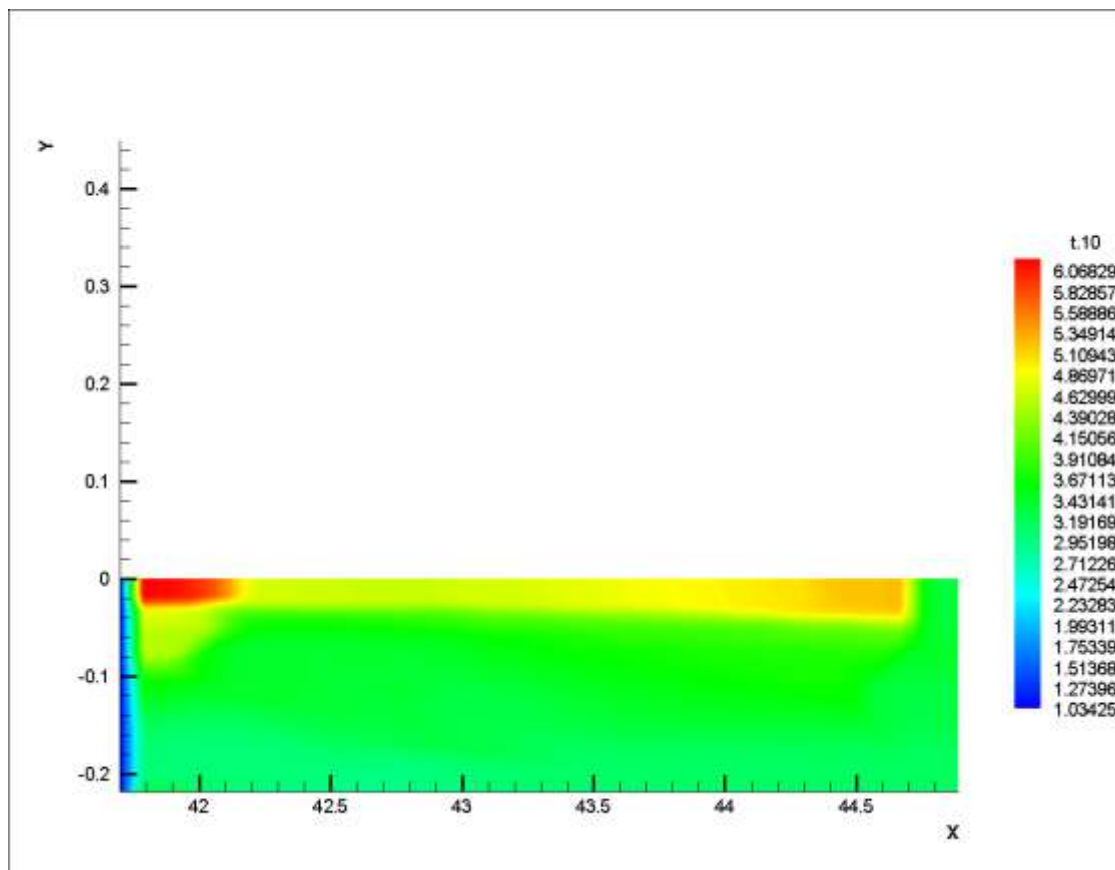


Рис. 5. Безразмерное поле температуры в момент времени $t=0.3467$ с

Наличие пограничного слоя на холодных стенках приводит к формированию максимума температуры в окрестности оси симметрии ствола ПГУ около движущегося поршня.

На рис. 6-8 представлены полученные картины распределения скорости газа в стволе ПГУ для различных моментов времени. Поля скоростей свидетельствуют об отсутствии отрыва потока по мере развития процесса. Отрыв возникает только на его завершающей стадии, когда градиент давления, возникший у торца ПГУ, приводит к возникновению течения навстречу тормозящемуся поршню, что показано на рис. 8.

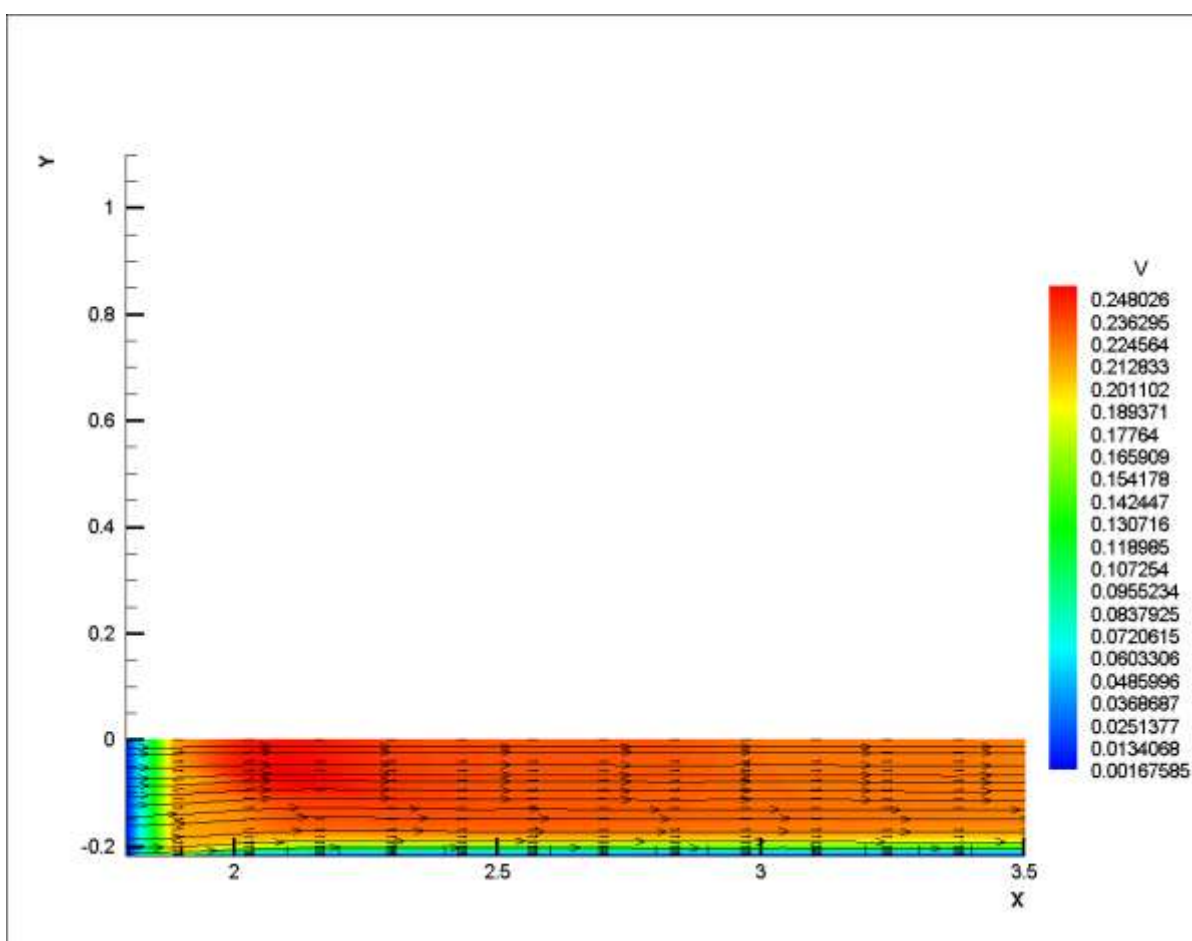


Рис. 6. Безразмерное поле скорости в момент времени $t=0.061$ с

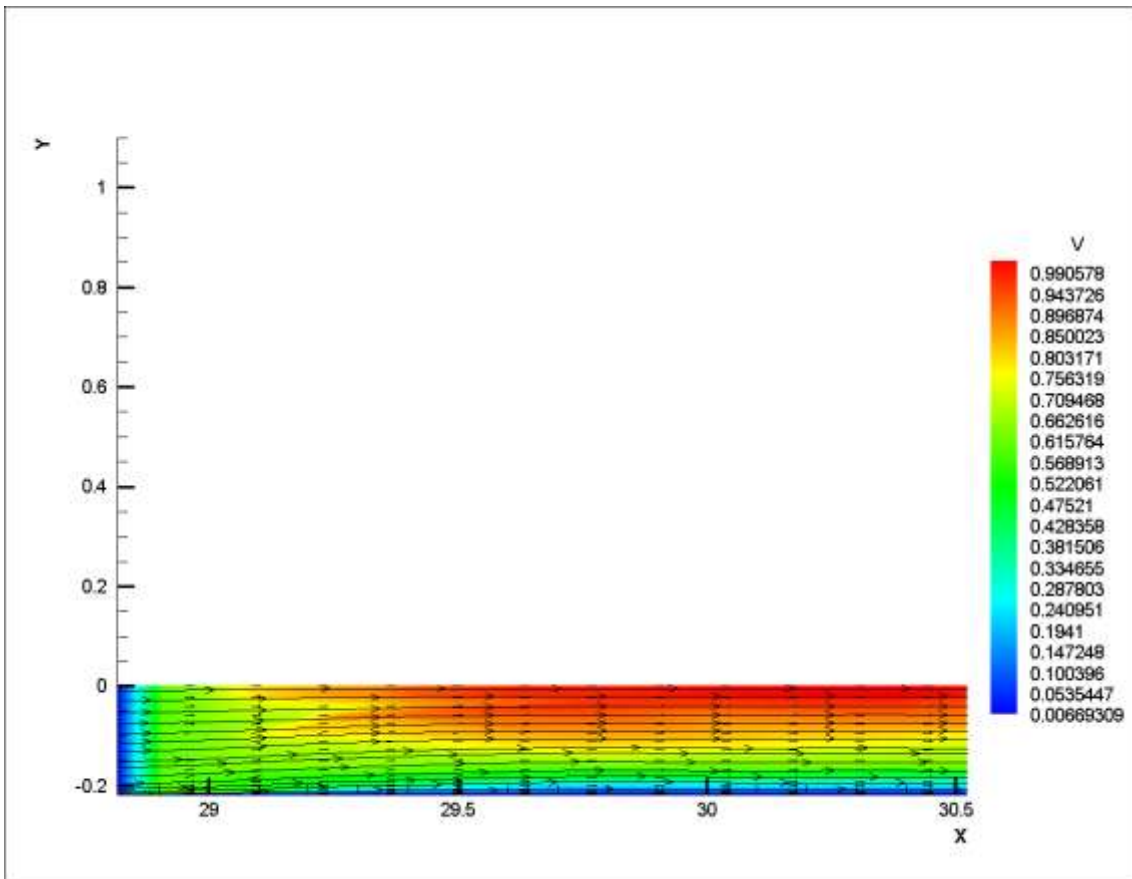


Рис. 7. Безразмерное поле скорости в момент времени $t=0.2712$ с

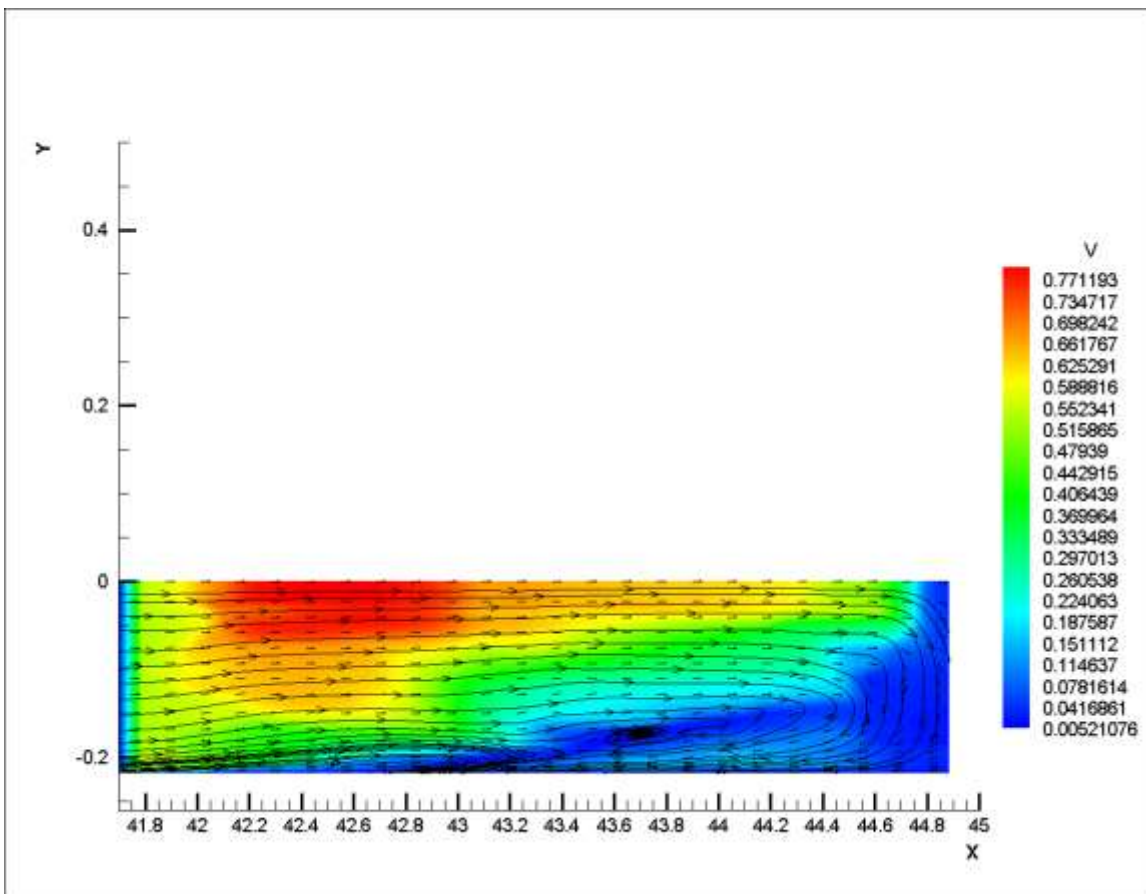


Рис. 8. Безразмерное поле скорости в момент времени $t=0.3467$ с

Полученные в ходе проведенных расчетов графики движения поршня и давления газа, представленные на рис. 9-10, иллюстрируют хорошее соответствие экспериментальных данных и результатов численного расчета. Расчетные данные получены в рамках уравнений Эйлера (точки) и в рамках уравнений Навье-Стокса (треугольники) и, как можно видеть на представленных графиках, практически совпадают между собой.

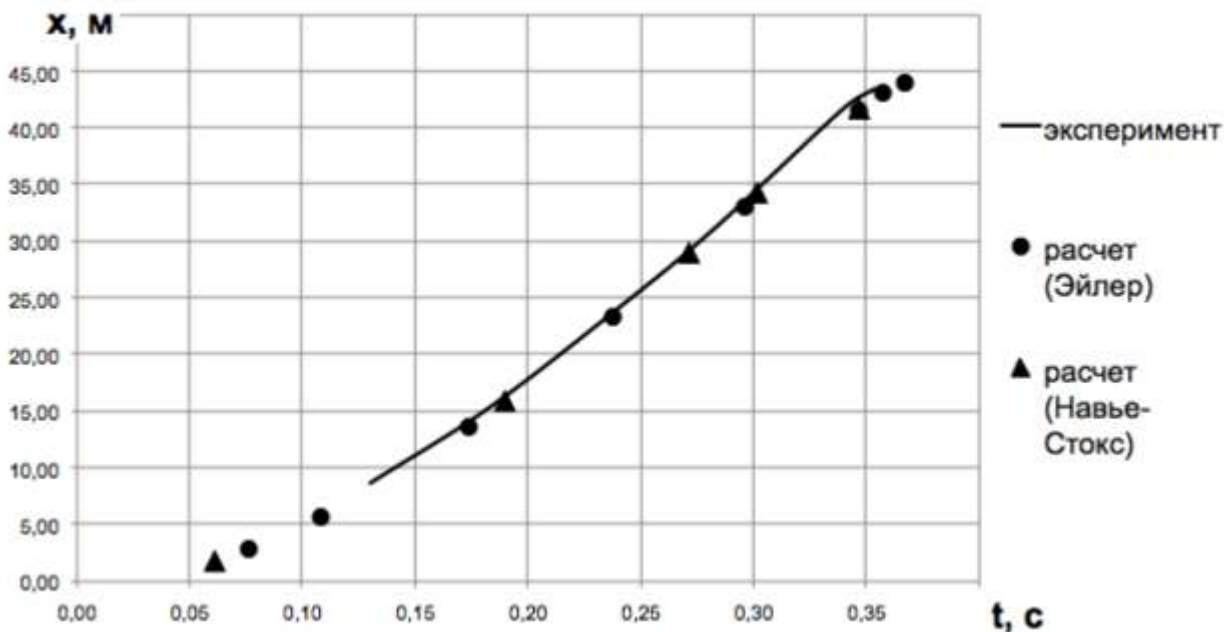


Рис. 9. Положение поршня в зависимости от времени

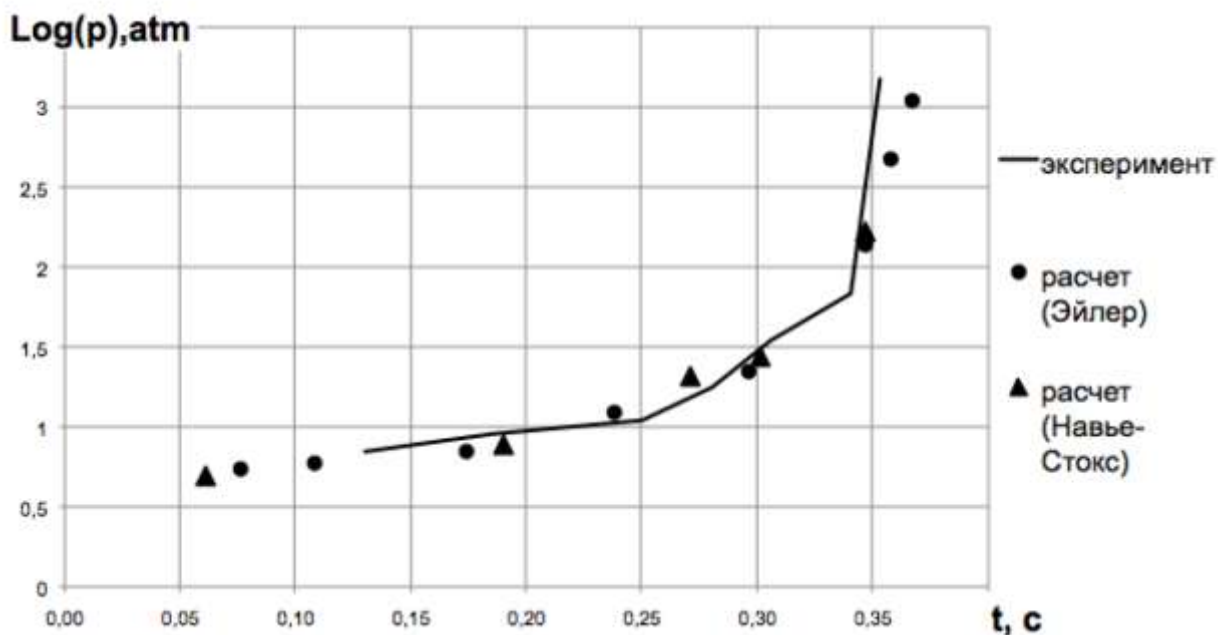


Рис. 10. Давление газа в зависимости от времени

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант №10-08-00501-а.

Библиографический список

1. Кислых В.В., Крапивной К.В. Использование неизоэнтропического многокаскадного сжатия для получения плотного высокотемпературного газа // Теплофизика высоких температур. 1990. Т.28.№6. с 1195 – 1204
2. Войнович П.А., Жмакин А.И., Киселев А.С., Панасенко А.В., Фурсенко А.А. О расчете распространения профилированных ударных волн // Препринт №1426. Ленинград.: ФТИ им. А.Ф. Иоффе АН СССР. 1990. 49 с
3. Пейре Р., Тейлор Т. Вычислительные методы в задачах механики жидкости. - Л.:Гидрометеоиздат, 1986
4. Даньков Б.Н., Кудимов Н.Ф., Липницкий Ю.М., Панасенко А.В., Сазонов В.В. Математическое моделирование транзвуковых режимов течения газов около надкалиберных обтекателей РН. // Материалы XVI Международной конференции по Вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС '2009). Алушта, Крым. 25 – 31 мая 2009 г.- М: Вузовская книга,2009.
5. Кудимов Н.Ф., Панасенко А.В., Третьякова О.Н. Математическое моделирование течения газа в поршневой газодинамической установке. // Тезисы докладов 9-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика - 2010». Москва, 16-18 ноября 2010. – М: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2010. С.169-170..
6. Кудимов Н.Ф., Третьякова О.Н.. О выборе математической модели теплопереноса в поршневой газодинамической установке. // В сб.: Тезисы докладов Международной школы-семинара "Физика в системе высшего и среднего образования России". Москва. 28-30 июня 2010./ Под ред. проф. Г.Г. Спирина. - М.: АПР, 2010. С.180-184.
7. Кудимов Н.Ф., Панасенко А.В. Расчет формирования течения газа в поршневой газодинамической установке. // В сб.: Материалы XVII Международной конференции по Вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2011) 25-31 мая 2011 г. Алушта. М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2011.С.752-753.

Сведения об авторах

Кислых Виталий Владимирович, старший научный сотрудник, к.т.н., ЦНИИмаш, г. Королев, Пионерская ул., 4.Тел.: (495)5135228.

Кудимов Никита Федорович, аспирант Московского авиационного института (национального исследовательского университет), МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993; тел.: +7-903-964-32-87; e-mail: itterasai@gmail.com

Панасенко Александр Викторович, старший научный сотрудник, к.т.н., ЦНИИмаш, г.Королев, Пионерская ул., 4.Тел.: (495)5134382, e-mail: akpanas@mail.ru

Третьякова Ольга Николаевна, профессор Московского авиационного института (национального исследовательского университета), к.ф.-м.н., МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993; тел.: +7-906-736-76-69, e-mail: tretiyakova_olga@mail.ru