

$t$	$x$	$y$	$z$	$v_x$	$v_y$	$v_z$
0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0
0.0	1.52	0.0	0.0	0.0	0.7684	0.2597
11.3929	1.4887	-0.2901	-0.0981	0.1634	0.7527	0.2544
11.3467	1.48087	-0.3248	-0.1098	0.1836	0.7486	0.2530

На рис. 1 видно, что оптимальное управление в случае функционала (3) состоит из пяти этапов, среди которых первый, третий и пятый являются активными, где  $|\mathbf{p}| = 1$ , а второй и четвёртый – пассивными,  $|\mathbf{p}| = 0$ . Длительности этапов в порядке их следования в безразмерных переменных равны 1.5965, 2.5799, 1.6771, 4.2468, 1.2926. При этом суммарная длительность пассивных этапов составляет 59.92% от общей длительности перелёта. В случае функционала (4) вектор управления представляет собой непрерывную функцию времени.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сапунков Я.Г. Кватернионные элементы орбиты в задаче оптимального управления для встречи двух космических аппаратов // Математика. Механика: Сб. науч. тр. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2002. Вып. 4. С. 210 – 213.
2. Сапунков Я.Г. Применение кватернионных элементов орбиты в задаче оптимального управления космическим аппаратом // Проблемы и перспективы прецизионной механики и управления в машиностроении: Материалы междунар. конф. ИПТМУ РАН. Саратов, 2002. С. 107 – 109.

УДК 533.6011

Я. Г. Сапунков, Г. П. Шиндяпин, В. А. Поршнев, Н. В. Федорев

### ЗАВИСИМОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕТОНАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ОТ ГЕОМЕТРИИ КАМЕРЫ И ДИФFUЗОРА

В работах [1, 2] на основе одномерного приближения был предложен метод расчёта движения продуктов детонации и воздуха в цилиндрической детонационной камере длиной  $l_1$ , соединённой с коническим диффузором с углом отклонения образующей конуса от оси симметрии  $\beta$  и длиной  $l_0$ . В настоящей статье приведены результаты расчётов движения газов в детонационном двигателе для различных размеров диффузора. Исследуется влияние формы диффузора на суммарный импульс давления.

**Краткое описание постановки задачи и метода решения.** В [2] для расчёта движения продуктов детонации взрывчатой смеси, которая в начальный момент времени заполняла цилиндрическую камеру, и воздуха, заполнявшего конический диффузор, была поставлена краевая задача для систем дифференциальных уравнений движения газообразных сред с

соответствующими начальными и граничными условиями. Движение продуктов детонации на начальном этапе, когда детонационная волна в режиме Чепмена-Жуге распространяется от закрытого конца камеры до сечения, в котором камера соединяется с диффузором, описывается автомодельным решением, представленном в [1]. После завершения этого этапа в детонационном двигателе начинается совместное движение продуктов детонации и воздуха, разделённых контактными разрывом.

Для решения краевой задачи были составлены две программы на языке *PASCAL*, в которых были реализованы разные методы расчёта движения воздуха в диффузоре. В первой программе движение воздуха между контактными разрывом и открытым концом диффузора вычислялось по формулам, которые определяют движение идеального газа под действием поршня в трубе переменного сечения, так как контактный разрыв можно рассматривать как поршень нулевой массы, а для расчёта движения продуктов детонации в камере и диффузоре использовался метод Лакса-Вендроффа. Во второй программе для определения параметров движения продуктов детонации и воздуха без выделения ударной волны использовался метод Лакса-Вендроффа. При этом явно выделялся только контактный разрыв, который разделяет продукты детонации и воздух. Сравнение результатов расчёта по первому и второму методам, реализованных в описанных выше программах, показывает на их хорошее соответствие друг другу. Это связано с тем, что воздух быстро вытесняется из диффузора продуктами детонации и основной вклад в суммарный импульс детонационного двигателя вносит движение продуктов детонации в камере и диффузоре и распределение давления в них. Расчёты и проведённые эксперименты показывают, что наличие диффузора существенно увеличивает суммарный импульс давления детонационного двигателя.

Ниже приводятся некоторые результаты расчёта движения газов в детонационном двигателе.

**Расчёты по определению суммарного импульса давления.** Расчёты движения продуктов детонации и воздуха в детонационном двигателе с диффузором проводились для различных значений угла  $\beta$  и длины диффузора  $l_0$ , чтобы оценить влияние размеров диффузора на суммарный импульс. Расчёты проводились для взрывчатой смеси, в которой величина  $h^2 = 2q\rho_1/\rho_0$ , где  $q$  – количество тепла, выделяющегося при сгорании единицы массы взрывчатой смеси, равно 60,  $\rho_1$  – плотность взрывчатой смеси,  $\rho_0$  – атмосферное давление. Отношения теплоёмкостей  $\gamma_0 = 1.4$  в воздухе,  $\gamma_1 = 1.38$  во взрывчатой смеси,  $\gamma_2 = 1.28$  в продуктах детонации. Длина цилиндрической камеры  $l_1$  в расчётах полагалась неизменной и равной 0.283 м. Суммарный импульс в случае камеры с диффузором определялся с учётом атмосферного давления в окружающей среде и с учётом геометрии диффузора. Результаты расчётов представлены в табл. 1, в которой приведены значения отношений суммарного импульса при наличии диффузора к суммарному импульсу двигателя без диффузора.

Таблица 1

$l_0, \text{м} \setminus \beta, ^\circ$	0.0	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0
0.05	1.0733	1.0870	1.1003	1.1134	1.1246	1.1350	1.1411
0.075	1.1105	1.1306	1.1506	1.1683	1.1844	1.1967	1.2120
0.1	1.1445	1.1730	1.1994	1.2238	1.2459	1.2639	1.2832
0.125	1.1739	1.2092	1.2431	1.2730	1.2999	1.3230	1.3383
0.15	1.2001	1.2446	1.2849	1.3230	1.3567	1.3856	1.4113
0.175	1.2256	1.2777	1.3246	1.3684	1.4086	1.4459	1.4775
0.2	1.2545	1.3158	1.3716	1.4215	1.4680	1.5126	1.5619
0.225	1.2886	1.3594	1.4237	1.4816	1.5345	1.5833	1.6289

Из данных, приведённых в табл. 1, видно, что с увеличением длины диффузора и с увеличением угла его раскрытия суммарная величина импульса увеличивается.

#### Пример расчёта параметров течения в камере и диффузоре.

Ниже приведены некоторые результаты расчёта при тех же исходных данных для случая, когда  $l_0=0.15$  м,  $\beta=10^\circ$ . В этом случае число Маха для детонационной волны относительно взрывчатой смеси равно 5.36, скорость её движения составляет 1778 м/с, и она проходит через всю камеру, заполненную взрывчатой смесью, за 0.00016 с. Давление в продуктах детонации непосредственно за фронтом повышается в 17.82 раза, и скорость их движения 755 м/с. К моменту завершения детонации область покоя в продуктах детонации имеет протяжённость 0.146 м, и давление в ней в 6.58 раз выше атмосферного. В этот момент времени в сечении, в котором цилиндрическая камера соединяется с диффузором, возникает произвольный разрыв, в результате чего образуются ударная волна, контактный разрыв и волна разрежения. Начальная скорость движения ударной волны по воздуху равна 1184 м/с, в этот момент времени давление за ней повышается в 14.67 раза. Начальная скорость движения контактного разрыва, разделяющего продукты детонации и воздух, прошедший через ударную волну, равна 909 м/с. Давление на дне камеры в продуктах детонации не изменяется в течение 0.00043 с. В момент времени 0.00035 с ударная волна достигает выходного сечения диффузора, и воздух начинает вытекать через него в окружающее пространство. В этот момент времени контактный разрыв находится в сечении диффузора с  $x = 0.408$  м. В момент времени 0.0043 с контактный разрыв достигает выходного сечения диффузора. В этот момент времени весь воздух вытеснен из диффузора и начинается истечение продуктов детонации.

В табл. 2 для некоторых моментов времени, указанных в первой строке, представлено во второй строке отношение давления на дне камеры к атмосферному давлению, а в третьей строке такая же величина в среднем сечении диффузора. Моменты времени указаны в  $10^{-2}$  с.

Таблица 2

0.0431	0.0663	0.0856	0.1050	0.1243	0.1436	0.1668	0.1823
6.579	3.815	2.711	1.978	1.351	0.912	0.584	0.443
3.815	1.825	1.841	1.002	1.000	0.653	0.950	0.903

В момент времени 0.001848 с в выходном сечении диффузора скорость движения продуктов детонации становится отрицательной, т. е. воздух начинает поступать через это сечение в двигатель. Расчёт проводился до этого момента времени. Из табл. 2 видно, что давление на дне камеры в этом промежутке времени монотонно уменьшается, давление в среднем сечении диффузора сначала уменьшается, затем его изменение принимает колебательный характер.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сапунков Я.Г., Шиндяпин Г.П., Поршнев В.А., Федорец О.Н. Математическая модель детонационного двигателя // Математика. Механика: Сб. науч. тр. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2001. Вып. 3. С. 178 – 181.

2. Сапунков Я.Г., Шиндяпин Г.П., Поршнев В.А., Федорец В.Н. Вычислительный эксперимент по определению газодинамических параметров в камере детонационного двигателя // Математика. Механика: Сб. науч. тр. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2002. Вып. 4. С. 213 – 216.

УДК 232.5; 232.135

**А. И. Сафрончик, М. И. Сафрончик**

### **НЕУСТАНОВИВШЕЕСЯ «ЗАПАЗДЫВАЮЩЕЕ» ТЕЧЕНИЕ КУЭТТА ВЯЗКОПЛАСТИЧНОЙ СРЕДЫ МЕЖДУ ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ СТЕНКАМИ**

Рассматривается неустановившееся течение вязкопластичной среды между параллельными плоскостями, одна из которых остаётся неподвижной, а другая начинает двигаться из состояния покоя с некоторой скоростью.

В отличие от вязкой и обычной Бингамовской жидкостей течение возникает лишь в области, непосредственно примыкающей к движущейся пластине, а остальная часть среды остаётся неподвижной. Область течения растёт, охватывая всё новые слои жидкости, пока не займёт всё пространство между пластинами.

Решение этой задачи связано с определёнными трудностями, так как она относится к классу не вполне корректно поставленных задач (область течения в начальный момент отсутствует и негде задавать начальное условие), а граница области течения изменяется во времени по неизвестному закону.

Для решения используется метод Колоднера [1], по-видимому, единственный из известных на сегодня методов решения подобных задач.

Считая площадь пластин достаточно большой, течение можно рассматривать как плоскопараллельное. Для нахождения единственной отличной от нуля компоненты скорости необходимо решить следующую краевую задачу: