

03

©1994 г.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ВОЗДУХА ОКОЛО СВЕРХЗВУКОВОГО КОНУСА ПОД УГЛОМ АТАКИ

Н.П. Менде, А.Б. Подласкин

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, 194021, Санкт-Петербург
(Поступило в Редакцию 17 ноября 1993 г.)

Приведены результаты томографической реконструкции плотности воздуха на основе интерференционных снимков течения около острого кругового конуса под углом атаки при числе Маха полета, равном 2. Проведено сравнение экспериментальных данных с результатами численного моделирования в рамках модели Эйлера в предположении автомодельности течения. Результаты могут быть полезны для проверки адекватности математических моделей движения газа и аппроксимационных свойств расчетных схем вычислительной газовой динамики.

Эксперимент

Течение около острого конуса с полууглом при вершине 10° исследовалось на баллистической установке с помощью оптического томографа [1], который включает пять сдвиговых интерферометров, просвечивающих объект под углами 0, 30, 60, 90 и 135° к горизонту (даны округленные значения). В результате опыта получалось пять интерференционных проекций течения (или 10 полупроекции, поскольку области с разных сторон от оси конуса доставляют независимую информацию), позволяющих восстановить формы волновых поверхностей зондирующих пучков света, которые в свою очередь могут быть связаны с плотностью газовой среды на пути пучков.

Конусу сообщалось колебательное движение с таким расчетом, чтобы в поле зрения интерферометров он оказался под углом атаки, близким к желаемому. Таким образом, получаемые мгновенные фотографии фиксируют некоторую фазу нестационарного обтекания конуса.

На рис. 1 приведена одна из проекций обтекания конуса, а именно на плоскость угла атаки.

Метод реконструкции плотности газа

Использованный нами метод реконструкции плотности газа по данным интерференционных измерений является обобщением классического зонного метода Х. Шардина на пространственные течения, выполненным впервые В.С. Татаренчиком [2]. По сравнению с работой [2] в алгоритм внесены некоторые изменения, в частности выбран другой вид аппроксимирующих выражений плотности, метод дополнен алгоритмом установления интенсивности газодинамических разрывов [3], а также статистическими приемами оценки значимости параметров в выражениях для плотности газа и доверительных интервалов распределений плотности. В этом виде алгоритм реконструкции плотности газа описан в работе [4].

Результаты реконструкции плотности воздуха

Алгоритм реконструкции плотности газа расчленяет трехмерную задачу на двумерные благодаря тому, что в каждом акте реконструкции рассматривается одно сечение объекта, параллельное плоскости, содержащей оси зондирующих пучков света. Такие сечения ориентированы в нашем случае перпендикулярно вектору скорости конуса и образуют угол с осью конуса, дополнительный (до 90°) к углу атаки. Полюс полярных координат в сечении мы выбирали в центре эллипса, образуемого следом поверхности конуса в расчетном сечении (не на оси конуса!). Полярный угол в сечении, который в дальнейшем назовем азимутальным, отсчитывали от наветренной образующей конуса. Выбор полюса в центре его эллиптического сечения и наклон сечения

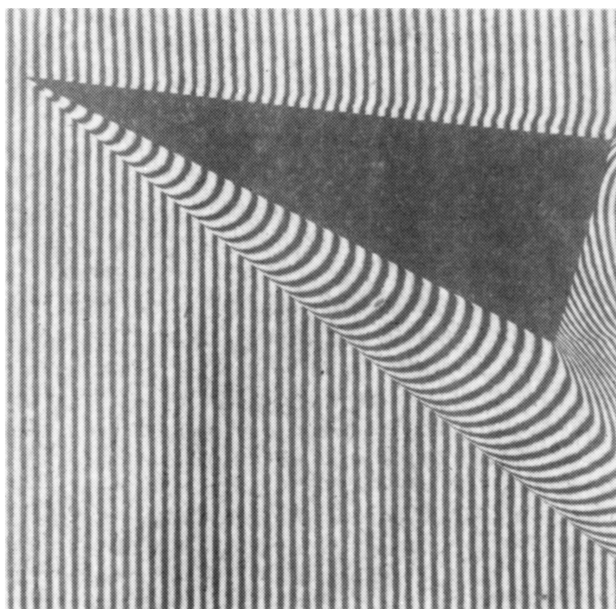


Рис. 1. Интерферограмма обтекания конуса под углом атаки 16.3° при числе Маха 2. Проекция на плоскость угла атаки.

к оси конуса приводят к тому, что полярные углы точек пересечения лучей, исходящих из вершины конуса, с расчетным сечением в используемой системе координат отличаются от соответствующих значений в системе координат с полюсом на оси конуса и вектор-радиусом, перпендикулярным этой оси. Однако при небольших углах атаки этим отличием можно пренебречь. При сопоставлении полученных результатов с данными в других координатах можно также иметь в виду, что в областях, где сохраняется автомодельность конического течения, наклон сечения к оси не имеет значения: параметры вдоль образующих конических поверхностей постоянны. Таким образом, при сравнении с данными численного расчета специального внимания требуют только области, где проявляются вязкие эффекты, и веер разрежения. Нам представляется, что интерполирование данных численного моделирования в наклонное сечение привнесет меньшие погрешности, чем пересчет экспериментальных данных из нескольких наклонных сечений в сечение, нормальное к оси.

Зонный метод реконструкции плотности газа предполагает замену реального распределения плотности ступенчатой функцией: плотность газа в каждой зоне полагают постоянной в радиальном направлении и изменяющейся только в азимутальном. Для аппроксимации распределений плотности в азимутальном направлении мы использовали отрезки четных рядов Фурье. При этих условиях вычисленные значения плотности естественно приписывать радиусам середин зон при данном азимуте. По этой причине в проводимых ниже таблицах отсутствуют радиальные координаты, соответствующие следам головной ударной волны и поверхности конуса в расчетном сечении. Постоянные радиальные координаты середин зон даны в долях расстояний от поверхности конуса (в табл. 4 от линии центров эллиптических сечений конуса, нормальных вектору скорости) до головной ударной волны.

Выбор числа членов рядов Фурье для аппроксимации плотности осуществлялся путем проверки значимости коэффициентов при этих членах с использованием статистического критерия Стьюдента при 95%-ной доверительной вероятности. Дисперсии и доверительные интервалы коэффициентов оценивались по схеме обобщенного метода наименьших квадратов [5] для систем алгебраических уравнений относительно коэффициентов, правые части которых содержат остаточные оптические разности хода на зондирующих лучах для текущей зоны. Дисперсии аппроксимации, таким образом, оценивались по остаточной сумме квадратов оптических разностей кода и числу степеней свободы, равному числу полупроекции, уменьшенному на число искоемых коэффициентов. Получаемая оценка дисперсии разности кода позволяет оценить дисперсии коэффициентов ряда Фурье и их доверительные интервалы с использованием квантилей Стьюдента для заданной доверительной вероятности. Нарращивание длины отрезка ряда Фурье для каждой зоны велось до тех пор, пока доверительный полуинтервал старшего коэффициента оставался меньше 100% его величины, в противном случае коэффициент признавался незначимым и отбрасывался.

По найденным дисперсиям коэффициентов рядов Фурье рассчитывались доверительные интервалы выражений, описывающих плотность в каждой зоне. Корреляция коэффициентов приводит к тому, что ширина доверительного интервала изменяется по азимуту. По этой причине в табл. 1-4 даны величины доверительных полуинтервалов

Таблица 1. Безразмерная плотность воздуха в течении около конуса с полууглом при вершине 10° в сечении, пересекающем ось конуса на расстоянии двух диаметров его основания от вершины перпендикулярно вектору скорости конуса (угол атаки 11.2° , число Маха 2).

Безразмерный радиус	Азимутальный угол, град							Погрешность, %
	0	10	20	30	40	50	60	
	Значения безразмерной плотности воздуха							
.94	1.30	1.29	1.28	1.27	1.24	1.22	1.19	1.0-1.6
.81	1.34	1.33	1.32	1.30	1.28	1.25	1.22	1.9-2.4
.69	1.37	1.36	1.35	1.33	1.31	1.28	1.24	1.9-3.1
.56	1.40	1.39	1.38	1.36	1.33	1.29	1.26	2.2-3.5
.44	1.43	1.43	1.41	1.39	1.35	1.32	1.27	2.0-3.2
.31	1.47	1.46	1.44	1.42	1.38	1.34	1.29	1.6-2.5
.19	1.48	1.47	1.45	1.42	1.38	1.33	1.28	2.9-4.4
.06	1.52	1.51	1.48	1.43	1.37	1.31	1.23	1.8-2.9
	70	80	90	100	110	120		
	Значения безразмерной плотности воздуха							
.94	1.16	1.14	1.11	1.09	1.08	1.06		1.0-1.3
.81	1.19	1.16	1.13	1.11	1.09	1.07		1.7-2.0
.69	1.21	1.18	1.15	1.12	1.10	1.09		2.0-2.6
.56	1.22	1.19	1.15	1.13	1.10	1.09		2.4-3.0
.44	1.23	1.19	1.16	1.13	1.10	1.09		2.4-2.9
.31	1.25	1.20	1.16	1.13	1.11	1.09		1.9-2.3
.19	1.23	1.19	1.15	1.12	1.09	1.07		3.3-4.2
.06	1.17	1.10	1.05	1.01	.99	.98		2.4-3.3
	130	140	150	160	170	180		
	Значения безразмерной плотности воздуха							
.94	1.05	1.05	1.04	1.04	1.04	1.04		0.8-1.3
.81	1.06	1.06	1.05	1.05	1.05	1.05		1.3-2.0
.69	1.07	1.06	1.06	1.05	1.05	1.05		1.8-2.7
.56	1.07	1.07	1.06	1.06	1.06	1.06		2.1-3.1
.44	1.07	1.07	1.06	1.06	1.06	1.06		2.0-3.1
.31	1.07	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06		1.6-2.5
.19	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06		2.8-4.6
.06	.98	.98	.99	1.00	1.01	1.01		2.0-3.5

плотности для интервалов азимутального угла. Доверительные полуинтервалы распределений плотности рассчитаны при доверительной вероятности 0.95.

Одним из наиболее сложных вопросов решения некорректной задачи реконструкции плотности в рассматриваемой постановке оказывается выбор оптимального числа зон в рассматриваемом сечении. Чет-

Таблица 2. Безразмерная плотность воздуха в течении около конуса с полууглом при вершине 10° в сечении, пересекающем ось конуса на расстоянии двух диаметров его основания от вершины перпендикулярно вектору скорости конуса (угол атаки 12.1° , число Маха 2).

Безразмерный радиус	Азимутальный угол, град							Погрешность, %
	0	10	20	30	40	50	60	
	Значения безразмерной плотности воздуха							
.94	1.34	1.34	1.33	1.31	1.29	1.26	1.24	1.2-2.0
.81	1.37	1.37	1.36	1.34	1.31	1.28	1.25	1.7-2.8
.69	1.40	1.40	1.38	1.36	1.34	1.30	1.27	2.0-3.2
.56	1.43	1.43	1.41	1.39	1.36	1.32	1.28	2.6-4.1
.44	1.47	1.47	1.45	1.42	1.39	1.35	1.30	3.0-4.8
.31	1.51	1.50	1.48	1.45	1.41	1.36	1.31	2.6-4.2
.19	1.55	1.54	1.52	1.47	1.42	1.36	1.29	3.4-5.3
.06	1.56	1.55	1.52	1.47	1.40	1.33	1.25	3.5-5.6
	70	80	90	100	110	120		
	Значения безразмерной плотности воздуха							
.94	1.21	1.18	1.15	1.13	1.10	1.09		1.2-1.6
.81	1.22	1.19	1.16	1.13	1.10	1.08		1.8-2.2
.69	1.23	1.20	1.17	1.14	1.11	1.09		2.2-2.6
.56	1.24	1.21	1.17	1.14	1.11	1.09		2.8-3.4
.44	1.26	1.21	1.17	1.14	1.11	1.09		3.3-4.1
.31	1.26	1.21	1.17	1.13	1.10	1.08		3.1-3.8
.19	1.23	1.17	1.12	1.08	1.06	1.04		4.2-5.4
.06	1.17	1.11	1.05	1.01	.99	.97		4.9-6.6
	130	140	150	160	170	180		
	Значения безразмерной плотности воздуха							
.94	1.07	1.06	1.05	1.05	1.04	1.04		1.1-1.7
.81	1.07	1.06	1.05	1.04	1.04	1.04		1.6-2.4
.69	1.08	1.06	1.06	1.05	1.05	1.05		1.8-2.9
.56	1.08	1.06	1.06	1.05	1.05	1.05		2.4-3.8
.44	1.07	1.06	1.06	1.05	1.05	1.05		2.9-4.6
.31	1.06	1.05	1.05	1.05	1.04	1.04		2.7-4.3
.19	1.03	1.03	1.04	1.04	1.04	1.05		3.6-5.9
.06	.97	.98	.99	1.00	1.00	1.01		4.1-7.2

кий критерий оптимизации их числа отсутствует. Распространенное мнение о том, что в силу последовательного характера зонного алгоритма реконструкции происходит катастрофическое накопление ошибок во внутренних зонах по мере увеличения числа зон, является ошибочным, как это показано в работе [6]. Погрешности реконструкции действительно растут при увеличении числа зон, однако это происхо-

Таблица 3. Безразмерная плотность воздуха в течении около конуса с полууглом при вершине 10° в сечении, пересекающем ось конуса на расстоянии двух диаметров его основания от вершины перпендикулярно вектору скорости конуса (угол атаки 16.3° , число Маха 2).

Безразмерный радиус	Азимутальный угол, град							Погрешность, %
	0	10	20	30	40	50	60	
Значения безразмерной плотности воздуха								
.94	1.44	1.43	1.42	1.40	1.37	1.33	1.30	0.6-1.0
.81	1.48	1.47	1.46	1.43	1.40	1.36	1.32	0.8-1.4
.69	1.51	1.51	1.49	1.46	1.42	1.38	1.33	1.1-1.8
.56	1.55	1.54	1.52	1.49	1.45	1.40	1.35	1.7-2.7
.44	1.59	1.58	1.55	1.52	1.47	1.42	1.36	2.1-3.2
.31	1.63	1.62	1.59	1.55	1.49	1.43	1.36	3.2-5.0
.19	1.67	1.66	1.63	1.57	1.50	1.41	1.33	3.5-5.4
.06	1.73	1.72	1.67	1.60	1.50	1.40	1.29	3.7-5.8
Значения безразмерной плотности воздуха								
	70	80	90	100	110	120		
Значения безразмерной плотности воздуха								
.94	1.26	1.22	1.18	1.14	1.11	1.08		0.7-0.8
.81	1.27	1.23	1.19	1.15	1.11	1.09		0.9-1.1
.69	1.28	1.24	1.19	1.15	1.12	1.09		1.2-1.5
.56	1.29	1.24	1.19	1.15	1.11	1.08		1.9-2.3
.44	1.30	1.24	1.18	1.14	1.10	1.07		2.3-2.8
.31	1.29	1.22	1.17	1.12	1.08	1.05		3.7-4.7
.19	1.24	1.16	1.10	1.05	1.01	.99		4.4-5.8
.06	1.18	1.08	1.00	.94	.90	.88		5.5-7.8
Значения безразмерной плотности воздуха								
	130	140	150	160	170	180		
Значения безразмерной плотности воздуха								
.94	1.06	1.04	1.03	1.02	1.02	1.02		0.6-0.8
.81	1.06	1.05	1.03	1.02	1.02	1.02		0.7-1.1
.69	1.06	1.05	1.03	1.03	1.02	1.02		1.0-1.6
.56	1.06	1.05	1.03	1.03	1.02	1.02		1.6-2.4
.44	1.05	1.03	1.02	1.02	1.02	1.02		2.0-3.1
.31	1.04	1.03	1.03	1.02	1.02	1.03		3.2-5.0
.19	.98	.98	.98	.99	.99	1.00		3.8-6.2
.06	.87	.88	.89	.91	.92	.92		4.8-8.5

дит относительно равномерно для всех зон и реальной причиной роста погрешностей оказывается уменьшение длин пути лучей в зонах (накопленная на этих лучах ОРХ может стать сравнимой с погрешностью ее измерений). Увеличение погрешностей во внутренних зонах связано с меньшей длиной пути лучей в них по сравнению с зонами внешними.

Таблица 4. Безразмерная плотность воздуха в течении около острого конуса с полууглом при вершине 10° в сечении, перпендикулярном вектору скорости конуса непосредственно за его основанием (угол атаки 12.1° , число Маха 2).

Безразмерный радиус	Азимутальный угол, град							Погрешность, %
	0	10	20	30	40	50	60	
Значения безразмерной плотности воздуха								
.98	1.32	1.32	1.31	1.29	1.27	1.25	1.22	0.7-1.3
.95	1.35	1.34	1.33	1.32	1.29	1.27	1.24	1.1-2.0
.92	1.37	1.36	1.35	1.33	1.31	1.28	1.25	1.3-2.2
.88	1.39	1.39	1.37	1.35	1.33	1.30	1.27	1.6-2.6
.85	1.41	1.41	1.39	1.37	1.35	1.31	1.28	1.8-3.0
.82	1.44	1.43	1.42	1.39	1.36	1.33	1.29	1.9-3.1
.78	1.46	1.45	1.43	1.41	1.38	1.34	1.30	2.3-3.8
.75	1.47	1.47	1.45	1.43	1.39	1.35	1.31	2.8-4.5
.72	1.44	1.44	1.43	1.41	1.39	1.36	1.33	3.1-4.1
.68	1.46	1.46	1.45	1.43	1.40	1.37	1.34	3.2-4.2
.63	1.37	1.35	1.31	1.25	1.18	1.09	1.01	7.1-9.2
.54	1.04	1.03	1.00	.95	.88	.81	.74	9.8-14.6
.46	.58	.58	.57	.56	.55	.53	.51	10.6-12.9
.38	.34	.34	.34	.34	.34	.34	.34	14.4
.29	.28	.28	.28	.28	.28	.28	.28	11.8
.21	.27	.27	.27	.27	.27	.27	.27	13.3
.12	.26	.26	.26	.26	.26	.26	.26	15.4
.04	.26	.26	.26	.26	.26	.26	.26	44.0
	70	80	90	100	110	120		
Значения безразмерной плотности воздуха								
.98	1.19	1.17	1.14	1.12	1.10	1.08		0.7-0.9
.95	1.21	1.18	1.15	1.12	1.10	1.08		1.1-1.2
.92	1.22	1.19	1.16	1.13	1.11	1.09		1.3-1.6
.88	1.23	1.20	1.17	1.14	1.11	1.09		1.6-1.9
.85	1.24	1.21	1.17	1.14	1.11	1.09		1.8-2.3
.82	1.25	1.21	1.18	1.14	1.11	1.09		2.0-2.4
.78	1.26	1.22	1.18	1.14	1.12	1.09		2.5-3.3
.75	1.26	1.22	1.18	1.14	1.11	1.09		3.1-3.8
.72	1.29	1.26	1.22	1.18	1.14	1.10		2.5-2.9
.68	1.30	1.25	1.21	1.17	1.12	1.08		2.6-3.2
.63	.93	.87	.83	.81	.82	.84		11.7-14.6
.54	.67	.61	.57	.54	.52	.52		19.0-25.9
.46	.49	.46	.44	.42	.39	.37		10.8-24.0
.38	.34	.34	.34	.34	.34	.34		14.4
.29	.28	.28	.28	.28	.28	.28		11.8
.21	.27	.27	.27	.27	.27	.27		13.3
.12	.26	.26	.26	.26	.26	.26		15.4
.04	.26	.26	.26	.26	.26	.26		44.0

Таблица 4. (Продолжение)

Безразмерный радиус	Азимутальный угол, град							Погрешность, %
	130	140	150	160	170	180		
	Значения безразмерной плотности воздуха							
.98	1.06	1.05	1.05	1.04	1.04	1.04	0.6-1.0	
.95	1.07	1.05	1.05	1.04	1.04	1.03	1.0-1.5	
.92	1.07	1.05	1.04	1.04	1.03	1.03	1.2-1.8	
.88	1.07	1.06	1.05	1.04	1.04	1.03	1.4-2.2	
.85	1.07	1.06	1.05	1.04	1.04	1.04	1.7-2.6	
.82	1.07	1.06	1.05	1.04	1.04	1.04	1.8-2.8	
.78	1.07	1.06	1.05	1.04	1.04	1.04	2.2-3.6	
.75	1.07	1.05	1.05	1.04	1.04	1.03	2.7-4.5	
.72	1.07	1.04	1.02	1.00	.99	.99	3.3-4.6	
.68	1.05	1.02	.99	.97	.96	.96	3.6-5.2	
.63	.88	.92	.97	1.00	1.03	1.04	15.3-21.9	
.54	.53	.55	.57	.59	.60	.61	26.9-40.7	
.46	.35	.33	.32	.31	.30	.30	28.2-41.8	
.38	.34	.34	.34	.34	.34	.34	14.4	
.29	.28	.28	.28	.28	.28	.28	11.8	
.21	.27	.27	.27	.27	.27	.27	13.3	
.12	.26	.26	.26	.26	.26	.26	15.4	
.04	.26	.26	.26	.26	.26	.26	44.0	

Для удобства использования полученных данных с целью оценки работоспособности расчетных схем численного моделирования результаты реконструкции плотности представлены в виде таблиц.

При реконструкции плотности воздуха в сечениях, пересекающих ось конуса на расстоянии двух диаметров его основания от вершины (табл. 1-3), мы использовали восемь кольцевых зон в расчетном сечении. Увеличение их числа вдвое приводит примерно к двукратному росту доверительного интервала для плотности и слегка изменяет ее значения во внутренних зонах. Однако эти изменения лежат в пределах приведенных в таблицах доверительных полуинтервалов. На этом основании мы сочли возможным считать найденные при восьми зонах распределения адекватными реальным в пределах 95%-ной доверительной вероятности.

Табл. 1 и 2 содержат данные для близких углов атаки (11-12°); они приведены вместе для оценки повторяемости результатов в разных опытах. Плотность газа отнесена к ее значению перед головной ударной волной. В табл. 3 даны результаты для угла атаки 16.3°.

Данные для сечения, проходящего непосредственно за дном конуса (табл. 4), нуждаются в дополнительных комментариях. При наличии в течении областей, резко отличающихся от смежных с ними по характеру поведения плотности, необходимо это учитывать при разбиении сечения на кольцевые зоны. Если кольцевая зона пересечет, например, наряду с веером разрежения с резким градиентом плотности

область донного течения, где плотность почти постоянна, это существенно усложнит описание азимутального распределения плотности в зоне (а при наличии разрыва, пересекающего зону поперек, сквозная аппроксимация становится бессмысленной). Чтобы не усложнять задачу, перед разбиением на кольцевые зоны мы разделили сечение на кольцевые области: область квазиконического течения, веер разрежения и донную область. После этого каждая из названных областей была разделена на кольцевые зоны с равным шагом по безразмерной радиальной координате в пределах каждой из трех областей. Таким образом, границы областей с характерным поведением плотности оказались одновременно границами соответствующих кольцевых зон.

Общее число зон в сечении за дном конуса 18:10 зон в области квазиконического течения и по 4 зоны в веере разрежения и донной области.

Веер разрежения с подветренной стороны конуса занимает относительно узкий участок в расчетном сечении, что повлекло за собой малую ширину кольцевых зон в этом районе. Это в свою очередь резко сказалось на погрешности определения плотности в целом в области и особенно в окрестности азимутального угла 180° , где доверительный полуинтервал достиг величины порядка 40% (из-за малого пути света в зонах).

В табл. 4 можно обнаружить нефизичную немонотонность радиального распределения плотности при азимутальных углах $160-180^\circ$ (выбросы при радиальной координате 0.63). Эта погрешность (укладывающаяся, впрочем, в приведенный доверительный интервал), по-видимому, является следствием ошибок при определении внешней границы веера разрежения, которая идентифицируется на снимке как разрыв второй производной линии, совпадающей с центром интерференционной полосы (разрыв кривизны полосы [7]). Найти точку разрыва кривизны полосы с хорошей точностью очень трудно.

Чтобы проиллюстрировать результаты более наглядно, приведем несколько графиков распределений плотности. На рис. 2 дано азиму-

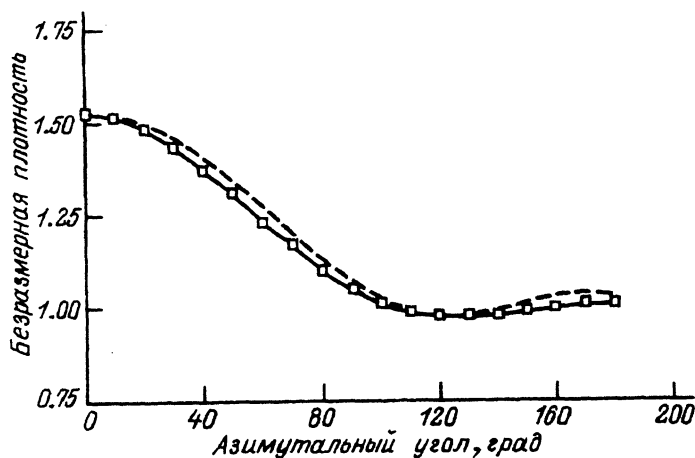


Рис. 2. Распределение плотности воздуха у поверхности конуса. Сплошная кривая — данные табл. 1; штриховая — результаты газодинамического расчета, выполненные авторами работы [8]. Угол атаки 11.2° .

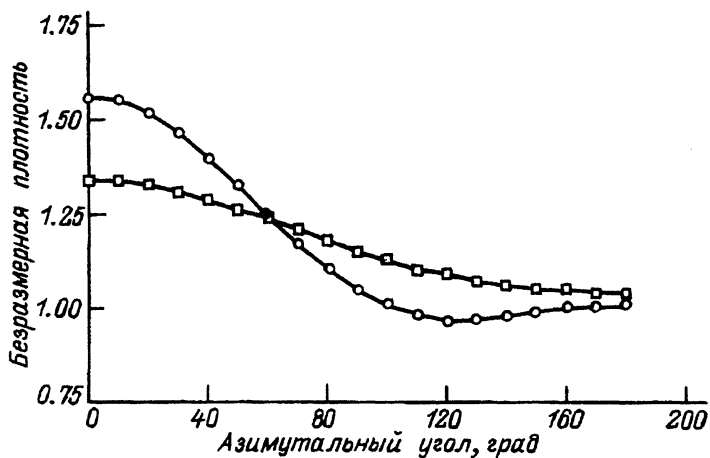


Рис. 3. Распределение плотности воздуха у поверхности конуса.

Кружки — плотность в зоне, примыкающей к поверхности конуса; квадратики — вблизи головной ударной волны. Угол атаки 12.1° (данные табл. 2).

тальное распределение плотности в зоне, примыкающей к поверхности конуса для угла атаки 11.2° (данные из табл. 1). Штриховой линией показано распределение плотности на поверхности конуса, полученное авторами [8] при численном моделировании автомодельного течения около конуса в рамках модели Эйлера. На рис. 3 даны распределения плотности за головной ударной волной и вблизи поверхности конуса при угле атаки 12.1° .

На рис. 4 показан характерный вид доверительного интервала азимутального распределения плотности у поверхности конуса и результаты численного газодинамического расчета [8] для угла атаки 16.3° .

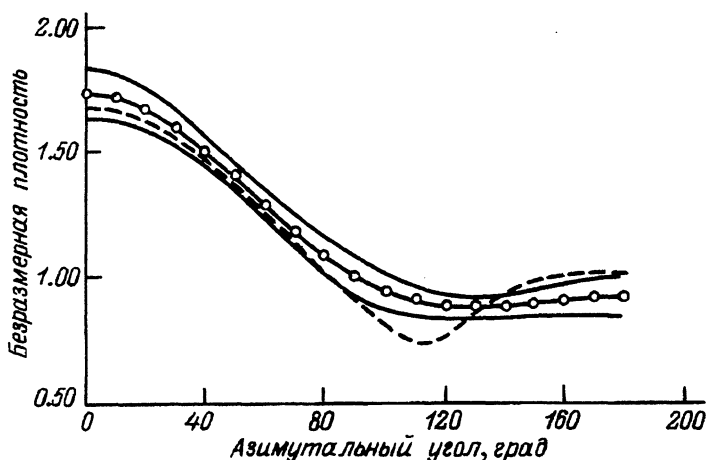


Рис. 4. Распределение плотности воздуха у поверхности конуса.

Сплошная кривая с точками — данные табл. 3; кривые без точек — границы доверительного интервала при доверительной вероятности 0.95; штриховая линия — результаты газодинамического расчета, выполненные авторами работы [8]. Угол атаки 16.3° .

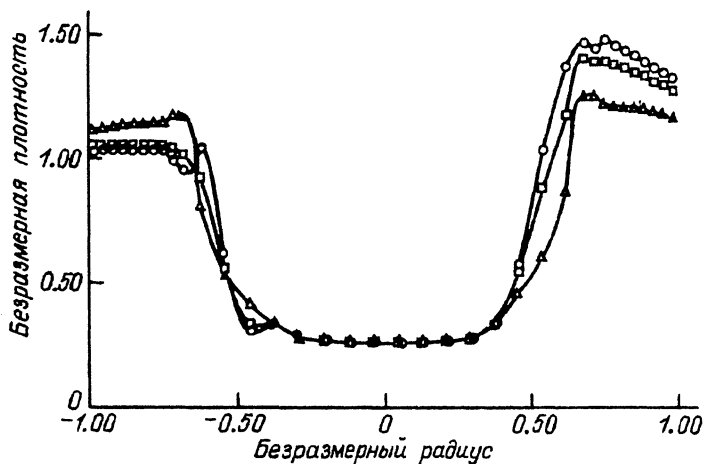


Рис. 5. Распределение плотности воздуха в сечении за дном конуса вдоль трех азимутальных направлений, перпендикулярных вектору скорости и задаваемых дополнительными азимутальными углами $0/180$ (кружки), $40/140$ (квадратики) и $80/100^\circ$ (треугольники).

С подветренной стороны безразмерный радиус отрицателен. Угол атаки 12.1° (данные табл. 4).

Как уже отмечалось, изменение ширины доверительного интервала объясняется корреляцией коэффициентов разложения плотности газа. Более существенное различие экспериментальных и расчетных данных по сравнению с рис. 2 может иметь причиной проявление вязких эффектов с подветренной стороны конуса при большем угле атаки.

На рис. 5 приведены несколько радиальных распределений плотности воздуха в сечении за дном конуса для разных значений азимутального угла.

Погрешность определения числа Маха во всех опытах не превышает 2.5%.

Заключительные замечания

Угловая скорость колебаний конуса и его замедление в полете не регистрировались по той причине, что оптический томограф был собран в виде отдельной установки, не обеспечивающей траекторных измерений, которые позволили бы определить упомянутые параметры. В связи с этим полученные данные для нестационарного обтекания отнесены лишь к мгновенным значениям угла атаки и числа Маха, что полезно иметь в виду при сопоставлении с данными численного расчета.

При решении некорректных обратных задач вопрос адекватности найденной модели реальному распределению искомого параметра остается, вообще говоря, открытым. По этой причине приведенные доверительные интервалы распределений плотности не следует рассматривать как вполне строгую меру достоверности результата, они, скорее, полезны для придания различного веса данным в пределах полученных распределений.

Авторы признательны Н.С. Бачмановой за проведение численных расчетов для условий эксперимента.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 94-02-14797).

Список литературы

- [1] *Kovalev P.I., Komissaruk V.A., Mende N.P.* // Opt. and Laser Technol. 1983. Vol. 15. P. 141.
 - [2] *Татаренчик В.С.* // Тр. Военно-воздушной инженерной академии им. Н.Е.Жуковского. 1964. Вып. 11. С. 1059.
 - [3] *Казанджан Э.П., Сухорукич В.С.* // Оптические методы исследований в баллистическом эксперименте / Под ред. Г.И. Мишина. Л.: Наука, 1979. С. 158.
 - [4] *Комиссарук В.А., Менде Н.П., Попов Л.Н.* Препринт Физико-технического ин-та. № 1349. 1989.
 - [5] *Ермаков С.М., Жигляевский С.В.* Математическая теория оптимального эксперимента. Учебное пособие. М.: Наука, 1987.
 - [6] *Менде Н.П.* Препринт Физико-технического ин-та. № 1350. 1989.
 - [7] *Губчик А.А., Казанджан Э.П., Сухорукич В.С.* // Изв. АН СССР. Сер. МЖГ. 1970. № 1. С. 169.
 - [8] *Бачманова Н.С., Лапыгин В.И., Липницкий Ю.М.* // Изв. АН СССР. Сер. МЖГ. 1973. № 6. С. 79.
-