## ОБОЗРЕНИЕ ПРИКЛАДНОЙ И ПРОМЫШЛЕННОЙ Том 19 МАТЕМАТИКИ Выпуск 2,3 2012

В. Г. В ы с о т и н а (Москва, ТВП). Численное исследование влияния отношения давлений на осесимметричный распад вихря в трубе методом Годунова.

В работе, представленной данным докладом, показаны результаты численного изучения методом Годунова влияния отношения давлений  $\Delta \equiv P_{\rm BbIX.}/P_0$  на явление осесимметричного распада вихря в трубе.

В [1] была показана возможность расчета методом Годунова осесимметричного распада вихря в закрученном течении воздуха в трубе длиной 1000 мм и внутренним диаметром 80 мм, геометрия которой была задана соответствующей геометрии, изученной экспериментально в [2]. В [3] обсуждалось сравнение результатов расчетов явления осесимметричного распада вихря в трубе методом Годунова с результатами эксперимента [2, 5] и расчетом [4] и показано, что имеет место качественное согласование результатов расчетов, в том числе формы полученного «a stable bubble» методом Годунова с приведенными в [2, 4, 5] результатами.

Расчеты были проведены для отношений давлений  $\Delta=0,975$ , 0,980, 0,985, 0,990, 0,995, для следующих параметров:  $P_0=1042399,8~\Pi a;~\rho_0=1,1985~\kappa \Gamma/m^3;~\kappa=1,4;$   $R=287,15~m^2/(c^2~K^\circ);~\mathrm{Re}\approx10^4\div10^5$ .

Разностная сетка составляла  $100 \times 25$  ячеек, размер ячеек сетки уменьшался по радиусу по направлению к оси и к внешней стенке трубы.

Для рассмотренных отношений давлений  $\Delta$  были проведены расчеты для углов закрутки потока на входе в трубу, равных  $\alpha = 0$ , 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 75, 80, 85, 88°. Увеличение угла закрутки  $\alpha$  для всех значений  $\Delta$  приводило к тому, что длина зоны замкнутого возвратного течения (пузыря) уменьшалась, а диаметр зоны увеличивался [1]. Течение с углом закрутки, при котором появляется пузырь (a stable bubble), имеет распределение статического давления со значительными положительными продольным и поперечным градиентами на входе в трубу. Градиенты давления уменьшались вниз по длине трубы на расстояние, приблизительно равное длине замкнутой зоны возвратно-циркуляционного течения (пузыря). На рис. 1 и 2 видно, что для  $\Delta = 0,975$  при угле закрутки  $\alpha = 50^{\circ}$  длина пузыря  $\approx 50$  см и «веер» распределения статического давления вдоль длины трубы также имеет длину  $\approx \div55$  см. Расход G = 0,7031 кг/с.

На рис. 3 показаны форма и размеры пузыря в зависимости от отношения давлений  $\Delta$ . Длина замкнутой зоны возвратного течения увеличивается от  $\Delta = 0,975$ до  $\Delta = 0,985$  (соответственно границы 5, 4, 3) от  $\approx 50$  до  $\approx 80$  см, а затем уменьшается: при  $\Delta = 0,990$  равна  $\approx 45$  см (граница 2), а при  $\Delta = 0,995$  равна 30 см. Радиальный размер зоны при  $\Delta = 0,990$  равен  $\approx 0,5$  см (граница 2). При остальных отношениях давлений радиальный размер зоны равен  $\approx 1,0$  см (границы 5, 4, 3, 1).

<sup>©</sup> Редакция журнала «ОПиПМ», 2012 г.





Рис. 1. Поле векторов скорости и «a stable bubble».



Рис. 2. Распределение статического давления вдоль длины трубы.



Рис. 3. Изменение размера и формы пузыря в зависимости от  $\Delta$  .

Рвыж/Рс	2									
0.995	-				_		0.0			_
.990	-					000	50			_
0.985						0				_
0.980	-			_		•				_
.975					_	-0				
0.970	0.0	1.0	20	20	40	50	60	20	9.0	

Рис. 4. Появление пузыря в зависимости от угла закрутки и отношения давлений.



Рис. 5. Изменение расхода воздуха в трубе в зависимости от угла закрутки потока на входе

Углы закрутки, при которых происходит появление пузыря в зависимости от  $\Delta$  показаны на рис. 4.

Пузырь появляется при углах закрутки  $\alpha = 50^{\circ}$  и 49° соответственно для  $\Delta = 0,975, 0,9800,985, 0,990$ . Угол закрутки, при котором появился пузырь, для  $\Delta = 0,995$  равен 64° (см. рис. 5).

Изменение расхода воздуха в трубе в зависимости от угла закрутки для отношений давлений  $\Delta: 0.975$  (звездочка), 0.980 (окружность), 0.990 (треугольник), 0.995 (косая черта). Появление пузыря каждый раз сопровождается резким повышением расхода в трубе. Резкое увеличение расхода зависит от отношения давлений и уменьшается с его увеличением. При  $\Delta = 0,995$  оно минимальное.

Влияние отношения давлений  $\Delta$  на появлении осесимметричного распада вихря в трубе проявляется в диапазоне значений  $0,990\div0,995$ , а именно, угол закрутки  $\alpha$ , при котором появляется пузырь, возрастает. Выявлено влияние отношения давлений на форму и размеры замкнутой зоны возвратноциркуляционного течения (пузыря), появляющегося в трубе, при явлении осесимметричного распада вихря. А также показано, что резкое увеличение расхода, сопровождающее появление пузыря, с увеличением  $\Delta$  уменьшается, и при  $\Delta=0,995$  увеличение расхода минимальное.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Высотина В. Г. Расчет распада вихря в осесимметричном канале методом Годунова. Обозрение прикл. и промышл. матем., 2011, т. 18, в. 3, с. 418–420.
- Uchida Sh., Nakamura Y., Ohsawa M. Experiments on the Axisymmetric Vortex Breakdown in a Swirling Air Flow. — Trans. Jap. Soc. Aeronaut. and Spase Sci., 1985, v. 27, № 78, p. 206–216.
- 3. Высотина В. Г. Расчет осесимметричного распада вихря в трубе методом Годунова. Обозрение прикл. и промышл. матем., 2011, т. 18, в. 5, с 620–622.
- 4. Grabowski W. J., Berger S. A. Solutions of the Navie–Stokes equations for votex dreakdown. J. Fluid Mech., 2002, v. 76, part 3, p. 525–544.
- Sarpkaya T.. On stationary and travelling vortex breakdowns. J. Fluid Mech., 1971, v. 45, part 3, p. 545–559.
- Годунов С. К. и др. Разностная схема для двумерных нестационарных задач газовой динамики и расчет обтекания с отошедшей ударной волной. — ЖВМ и МФ, 1961, т. 1., № 3, с. 1020–1050.
- 7. Дорфман Л.А. Численные методы в газодинамике турбомашин. Л.: Энергия, 1974.
- Высотина В. Г. Течение воздуха в осесимметричных каналах переменного сечения с выемками и кавернами. — Математическое моделирование, 2001, т. 13, № 10, с. 103–119.