

В. Г. В о с о т н а (Москва, ТВП). **Расчет осесимметричного распада вихря в трубе методом Годунова.**

В данном докладе обсуждается сравнение результатов численного изучения явления распада вихря в осесимметричной трубе методом Годунова [1] с результатами эксперимента [2, 4] и расчетом [3].

В [1] была показана возможность расчета методом Годунова осесимметричного распада вихря в закрученном течении воздуха в трубе, геометрия которой была задана соответствующей геометрии, представленной в [2]. Разностная сетка составляла 100×25 ячеек, размер ячеек сетки уменьшался по радиусу по направлению к оси и к внешней стенке трубы. В [2] «пузырь» (a stable bubble) был получен при закрутке потока, соответствующей углу установки лопаток 42° , и имел размеры около 40 мм в длину и диаметр около 32 мм. В [1] пузырь был получен при угле установки лопаток, равном 34° , и имел размеры 30 см в длину и диаметр около 10 мм. Параметры потока при этом были следующие: $P_{\text{вых.}}/P_0 = 0,992$, $P_0 = 1042399,8$ Па ($P_{\text{вых.}} = 1034060,6$ Па), $\rho_0 = 1,1985$ кг/м³, $\kappa = 1,44$, $R = 287,154$ м²/(с²К°), $Re \approx 10^4 \div 10^5$.

Для отношения давлений $P_{\text{вых.}}/P_0 = 0,992$ были проведены расчеты также для углов закрутки потока на входе в трубу, равных $\alpha = 60^\circ, 70^\circ, 75^\circ, 80^\circ, 85^\circ, 88^\circ$. Показано, что с увеличением угла закрутки длина зоны замкнутого возвратного течения (пузыря) уменьшалась, а диаметр увеличивался [1]. При угле закрутки 88° (соответственно, угол установки лопаток равен 2°) размер пузыря составлял в длину около 10 см, а в диаметре около 40 мм. В результате расчета методом Годунова получено распределение статического давления по длине канала. Распределение давления P_i/P_0 таково, что имеются значительный положительный продольный и радиальный градиенты давления на участке 0–30 см. В [2] показано распределение осевой составляющей скорости вдоль оси трубы. Здесь имеет место значительный отрицательный продольный градиент скорости вплоть до точки начала пузыря, что качественно согласуется с полученным в результате расчета методом Годунова распределением статического давления и распределениями осевой, тангенциальной и радиальной скоростей.

В [3] приведены результаты численного исследования распада вихря. Авторы решали полные стационарные осесимметричные уравнения Навье–Стокса для несжимаемой жидкости. Числа $Re = 100, 200, 500, 1000$. На входе в канал задавалось два вида распределения скоростей. На оси канала в результате расчетов получены при углах закрутки от 44° до 51° замкнутые зоны возвратного течения (осесимметричный распад вихря). Распределения давления и скорости вдоль оси канала имеют, соответственно, положительный и отрицательный градиенты, максимальные при числе $Re = 1000$, что качественно согласуется с результатами расчета методом Годунова.

В [4] представлены результаты экспериментального исследования закрученного течения воды в слабо расширяющейся цилиндрической трубе, когда наблюдались три различных вида распада вихря, в том числе и осесимметричный, наблюдавшийся при числах $Re = 4000, 6000, 7500$ и углах закрутки от 40° до 50° .

Сравнение формы осесимметричного пузыря, полученного в результате расчета методом Годунова, с результатом расчета [3] и эксперимента [4] показано на рисунке.

Как показали результаты экспериментов и расчетов (в том числе и результаты расчетов методом Годунова), основную роль в появлении осесимметричного распада вихря в трубе играет, конечно, достаточное закручивание потока, т.е. величина угла закрутки потока на входе в трубу. Вопрос влияния отношения давлений $P_{\text{вых.}}/P_0$ на появление осесимметричного пузыря в закрученном течении воздуха в трубе является предметом дальнейшей работы.

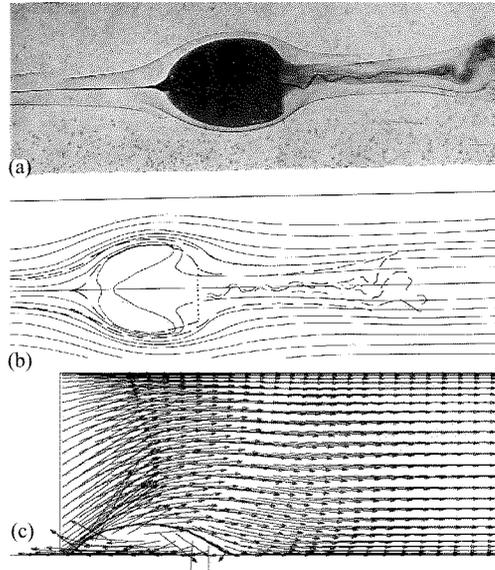


Рис. Осесимметричный распад вихря (stable bubble), полученный: а) — в эксперименте [3], (b) — в результате расчета [4], (c) — в результате расчета методом Годунова [1]

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Высотина В. Г.* Расчет распада вихря в осесимметричном канале методом Годунова. — *Обзорные прикл. и промышл. матем.*, 2011, т. 8, в. 3, с. 418–420.
2. *Shigeo Uchida, Yoshiaki Nakamura, Masataka Ohsawa.* Experiments on the Axisymmetric Vortex Breakdown in a Swirling Air Flow. — *Trans. Jap. Soc. Aeronaut. and Space Sci.*, 1985, v. 27, № 78, p. 206–216.
3. *Grabowski W. J., Berger S. A.* Solutions of the Navie–Stokes equations for vortex breakdown. — *J. Fluid Mech.*, 2002, v. 76, part 3, p. 525–544.
4. *Turgut Sarpkaya.* On stationary and travelling vortex breakdowns. — *J. Fluid Mech.*, 1971, v. 45, part 3, p. 545–559.
5. *Годунов С. К. и др.* Разностная схема для двумерных нестационарных задач газовой динамики и расчет обтекания с отошедшей ударной волной. — *Журнал вычисл. матем. и матем. физики*, 1961, т. 1., № 3, с. 1020–1050.
6. *Дорфман Л. А.* Численные методы в газодинамике турбомашин. Л.: Энергия, 1974.
7. *Высотина В. Г.* Течение воздуха в осесимметричных каналах переменного сечения с выемками и кавернами. — *Матем. моделирование*, 2001, т. 13, № 10, с. 103–119.