ОБОЗРЕНИЕ прикладной и промышленной Том 22 МАТЕМАТИКИ Выпуск 4 2015

В. Г. В ы с о т и н а (Москва, ТВП). Изменение локальных параметров потока воздуха при распаде вихря в трубе.

Выполнены расчеты структуры и распределения локальных параметров потока закрученного течения воздуха в осесимметричной трубе методом Годунова [1, 2]. Постановка задачи опубликована в [3].

В [4–9] приведены результаты изучения влияния угла закрутки a потока на входе в канал, отношения давлений, размеров и способа построения разностной сетки на численное решение задачи о распаде вихря в трубе, а также представлено сравнение результатов расчетов с экспериментальными [10, 11] и численными [12] результатами других авторов.

Целью работы, представленной данным докладом, являлось изучение изменения локальных параметров потока воздуха при распаде вихря в трубе для случая угла закрутки $a = 10^{\circ}$, когда в потоке отсутствует распад вихря, и для случая $a = 49^{\circ}$, когда распад вихря, «пузырь», имеет место быть. Для расчетов были выбраны следующие параметры потока: отношение давлений $P_{\rm вых}/P_0 = 0,990$, $P_0 = 1042399,8$ Па, $\rho_0 = 1,1985$ кг/м³, $\kappa = 1,4$, R = 287,15 м²/(с² K^o), Re $\approx 10^4 \div 10^5$. Использовалась разностная сетка размером 500×20 ячеек, которые уменьшаются по радиусу по направлению к оси и к внешней стенке трубы.

На первых трех рисунках показаны результаты расчетов для угла закрутки $a = 10^{\circ}$. Так, на рис. 1 приведены поле векторов скоростей и распределение статического давления вдоль длины канала: поле скоростей равномерное, давление вдоль длины канала практически не изменяется. Расход G = 0,7292 кг/с, $U_{zbx} = 119,97$ м/с.



Рис. 1. Поле векторов скорости и статическое давление вдоль канала, уго
л $\,a=10^\circ$

На рис. 2 показаны распределения вдоль длины трубы осевой и окружной составляющих скорости: обе (осевая и окружная) скорости незначительно уменьшаются к выходу из трубы и представляют собой постоянное значение вдоль всей длины трубы. Осевая скорость $U_Z/U_{ZBX} \approx 1,0$, а окружная скорость $U_0 \approx 0,2$.

[©] Редакция журнала «ОПиПМ», 2015 г.

2 XVI Всероссийский симпозиум по прикладной и промышленной математике



Рис. 2. Осевая и окружная составляющие скорости вдоль канала, уго
л $\,a=10^\circ$

Профили осевой и окружной составляющих скорости показаны на рис. 3. Профили окружной скорости представляют собой практически константу, не зависящую от радиуса, что, вообще говоря, соответствует некоторому среднему положению течения между течением по закону свободного вихря и течением по закону вынужденного вихря.



Рис. 3. Профили осевой и окружной составляющих скорости. Сечения 1–500, шаг 34, угол $a=10^\circ$

Результаты расчетов для угла закрутки $a=49^\circ\,$ показаны на рисунках 4–6. Поле векторов скорости содержит развитую зону возвратно-циркуляционного течения, «пузырь», занимающий длину от входного сечения до приблизительно 0,8 от общей длины канала. Появление «пузыря» сопровождается значительным поперечным положительным градиентом давления (см. рис. 4: расход $G=0,4859~{\rm kr/c}, \ U_{zbx}=65,82~{\rm m/c}).$



Рис. 4. Поле векторов скорости и статическое давление вдоль канала, угол закрутки $a=49^\circ$

Распределения осевой и окружной составляющих скорости вдоль длины трубы для угла закрутки $a = 49^{\circ}$ показаны на рис. 5. Как осевая, так и окружная составляющие скорости, плавно изменяясь вдоль канала, имеют довольно большие поперечные градиенты. Осевая скорость от входного сечения до примерно 0,8 от общей длины канала имеет вдоль оси значения отрицательные, что согласуется с длиной «пузыря».



Рис. 5. Осевая и окружная составляющие скорости вдоль канала, угол $a = 49^{\circ}$

На рис. 6 показаны профили осевой и окружной составляющих скорости для угла закрутки $a = 49^{\circ}$. Профили окружной скорости представляют собой набор кривых,

зависящих от радиуса так, что соответствуют течению с вращением жидкости как целого, т.е. имеет место течение по закону вынужденного вихря.



Рис. 6. Профили осевой и окружной скоростей. Сечения 1–500, шаг 34, уго
л $a=49^\circ$

Профили осевой и окружной составляющих скорости для случая угла закрутки $a = 49^{\circ} 0$ сравнивались с экспериментальными данными, приведенными в [1]. Сравнение представлено на рис. 7 и 8.



Рис. 7. Сравнение с экспериментом [1] профилей осевой и окружной скорости



Рис. 8. Сравнение с экспериментом [1] профилей осевой и окружной скорости

Для рис. 7 сечения 7–12 из 500, для рис. 8 сечения 51–100 из 500, шаг 2. Сплошные черные линии — расчет.

Результаты сравнения показывают достаточно верное согласование данных, полученных в расчетах автора и экспериментах [10].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Годунов С.К. и др. Разностная схема для двумерных нестационарных задач газовой динамики и расчет обтекания с отошедшей ударной волной. Журнал вычислит. матем. и матем. физики, 1961, т. 1, № 3, с. 1020–1050.
- 2. Дорфман Л. А. Численные методы в газодинамике турбомашин. Л.: Энергия, 1974.
- 3. *Высотина В. Г.* Течение воздуха в осесимметричных каналах переменного сечения с выемками и кавернами. Матем. моделирование, 2001, т. 13, № 10, с. 103–119.
- 4. Высотина В. Г. Расчет распада вихря в осесимметричном канале методом Годунова. — Обозрение прикл. и промышл. матем., 2011, т. 18, в. 3, с. 418–420.
- 5. Высотина В. Г. Расчет осесимметричного распада вихря в трубе методом Годунова. Обозрение прикл. и промышл. матем., 2011, т. 18, в. 5, с. 753–755.
- Высотина В. Г. Численное исследование влияния отношения давлений на осесимметричный распад вихря в трубе методом Годунова. — Обозрение прикл. и промышл. матем., 2012, т. 19, в. 2, с. 242–244.
- Высотина В. Г. Влияние размеров и способа построения разностной сетки на численное решение задачи о распаде вихря в трубе. — Обозрение прикл. и промышл. матем., 2012, т. 19, в. 4, с. 546–550.
- 8. Высотина В. Г. Расчет закрученного течения воздуха в коротком кососимметричном канале. — Обозрение прикл. и промышл. матем., 2013, т. 20, в. 4, с. 533–535.
- Высотина В. Г. О моделировании осесимметричного распада вихря в трубе методом Годунова. — Обозрение прикл. и промышл. матем., 2014, т. 21, в. 1, с. 4–49.
- 10. Shigeo Uchida, Yoshiaki Nakamura, Masataka Ohsawa. 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.
- Turgut Sarpkaya. On stationary and travelling vortex breakdowns. J. Fluid Mech., 1971, v. 45, part 3, p. 545–559.
- 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.