

В. Г. В ы с о т и н а (Москва, ОПИПМ). Особенности структуры закрученного по закону твердого тела (вынужденный вихрь) течения воздуха в длинной трубе.

В работе представлены результаты изучения влияния такого типа закрутки на входе в трубу, как задание во входном сечении закрутки по закону твердого тела (вынужденный вихрь), на структуру течения воздуха в длинной трубе. При всех прочих равных условиях для трех разных значений отношения давлений $P_{\text{вых}}/P_0 = 0,990, 0,980, 0,970$ получены решения со структурой, содержащей распад вихря в виде тороидальной зоны отрыва, обтекаемой закрученным основным потоком. Для расчетов использовался метод Годунова.

Постановка задачи опубликована в [4]. Результаты изучения распада вихря в прямой трубе методом Годунова [1, 2, 3] для постоянного во входном сечении угла закрутки $\alpha(\text{tg}(\alpha) = \text{const})$ представлено частично в [5, 6, 7], там же представлено сравнение с опытными данными [4].

Моделирование закрученного течения воздуха выполнялось в осесимметричной трубе длиной 1 метр с радиусом 0,04 м [4]. Использована разностная сетка равномерная по длине N и сгущающаяся к оси и внешнему обводу M , состоящая из 201×21 узлов.

Расчеты течения воздуха проведены для отношений давлений $P_{\text{вых}}/P_0 = 0,990, 0,980, 0,970$. Во входном сечении задавалась закрутка потока по закону твердого тела в диапазоне углов $\alpha = 10^\circ \div 87^\circ$. Использованы следующие параметры торможения: $P_0 = 100500,8$ Па; $\rho_0 = 1,1945$ кг/м³; $\kappa = 1,4$; $R_G = 287,15$ м²/(с² · К°); $Re \approx 10^4 - 10^5$.

На входе в канал задавался вид закрутки $Cn * \text{tg}(\alpha) * r_i/R$ — для вынужденного вихря. Здесь α — угол закрутки ($\alpha = 10^\circ \div 87^\circ$), R — радиус внешнего обвода трубы, r_i — текущий радиус ($r_i = r_1 \div R = r_M$; $i = 1 \div MI$, $MI = 20$, $M = 21$), Cn — нормальная к входному сечению скорость, $\text{tg}(\alpha)$ — тангенс угла α .

Графики профиля окружной составляющей скорости для угла закрутки $\alpha = 10^\circ$, соответствующие каждому значению отношения давлений $P_{\text{вых}}/P_0$ показаны на рис. 1.

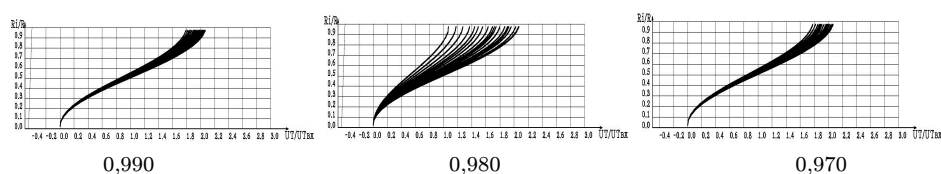


Рис. 1. Графики $U_T/U_{Z_{\text{вх}}}$ для угла закрутки $\alpha = 10^\circ$, в сечениях 1–200 с шагом 10. Вид закрутки $Cn * \text{tg}(\alpha) r_i/R$. Отношение давлений $P_{\text{вых}}/P_0 = 0,990, 0,980, 0,970$

Профили окружных скоростей соответствуют закрутке по закону твердого тела.

Графики изменения расхода для каждого значения $P_{\text{вых}}/P_0$ в зависимости от угла закрутки α приведены на рис. 2.

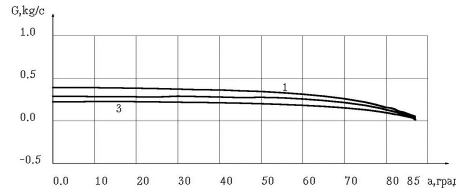


Рис. 2. Расход воздуха в зависимости от угла закрутки на входе α . Вид закрутки $Cn \cdot \text{tg}(\alpha) \cdot ri/R$. Отношение давлений $P_{\text{вых}}/P_0 = 0,990(3), 0,980, 0,970(1)$

Течение при вынужденном вихре не имеет случаев отрицательного расхода. Поведение потока при всех прочих равных условиях для трех значений отношения давлений $P_{\text{вых}}/P_0 = 0,990, 0,980, 0,970$ при задании закрутки во входном сечении в виде вынужденного вихря — $(Cn \cdot \text{tg}(\alpha) \cdot ri/R)$, похожее: в зависимости от изменения угла α всегда имеем положительный расход и три варианта структур течения. 1) $\alpha = 10^\circ \div 78^\circ$ — закрученное течение без особенностей. На рис. 3 — изменение полей скоростей в диапазоне углов от $\alpha = 20^\circ$ до 79° для $P_{\text{вых}}/P_0 = 0,990$. Аналогичная картина полей скоростей имеет место быть для $P_{\text{вых}}/P_0 = 0,980$ и $0,970$.

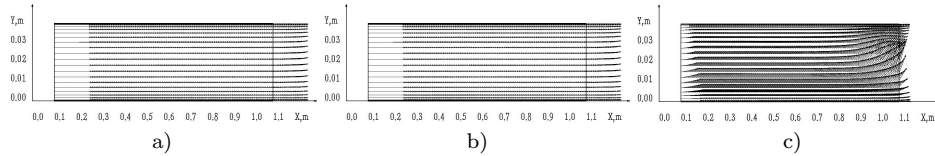


Рис. 3. Поля скоростей: а) $\alpha = 20^\circ$, б) $\alpha = 45^\circ$, в) $\alpha = 79^\circ$. Отношение давлений $P_{\text{вых}}/P_0 = 0,990$

Профили окружных составляющих скорости для $\alpha = 70^\circ$ показаны на рис. 4.

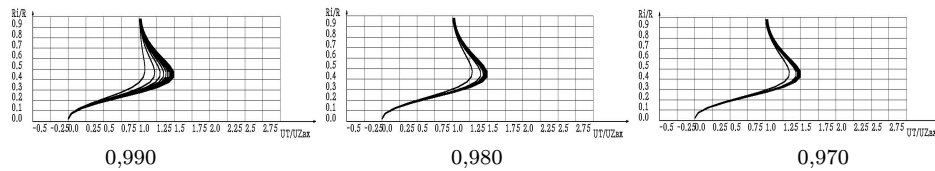


Рис. 4. Профили окружных скоростей для $\alpha = 70^\circ$. Отношение давлений $P_{\text{вых}}/P_0 = 0,990, 0,980, 0,970$

Профили окружных скоростей при $\alpha = 70^\circ$ не соответствуют закону твердого тела. 2) При углах $\alpha = 80^\circ \div 82^\circ$ происходит перестройка течения. На рис. 5 — поля скоростей для угла $\alpha = 80^\circ$.

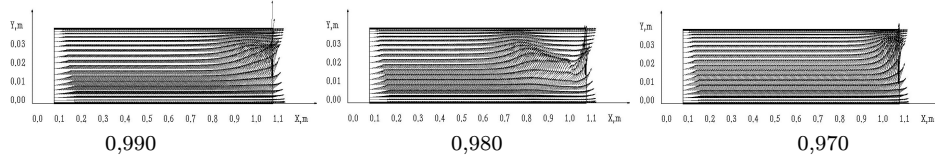


Рис. 5. Поля скоростей: а) $\alpha = 80^\circ$ Отношение давлений $P_{\text{вых}}/P_0 = 0,990, 0,980, 0,970$

В выходном сечении при $\alpha = 80^\circ$ и всех трех значениях $P_{\text{вых}}/P_0 = 0,990, 0,980$ и $0,970$ имеет место наличие диска тороидальной формы. Фрагменты выходного сечения поля скоростей для $\alpha = 80^\circ$ показаны на рис. 6.

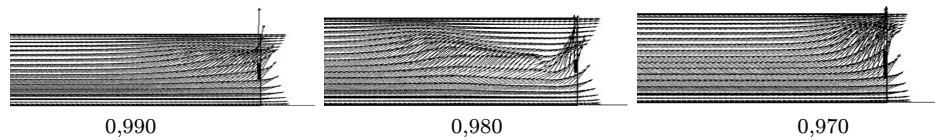


Рис. 6. Фрагменты полей скоростей для $\alpha = 80^\circ$. Отношение давлений $P_{\text{вых}}/P_0 = 0,990, 0,980, 0,970$

3) Для всех трех значений отношения давлений $P_{\text{вых}}/P_0 = 0,990, 0,980$ и $0,970$ при $\alpha = 83^\circ \div 87^\circ$ имеет место распад вихря в виде закрученного течения с замкнутой тороидальной зоной ("bagel"). С увеличением угла закрутки тороидальная зона уменьшается в продольных размерах и увеличивается по высоте. Поведение течения при $\alpha = 85^\circ$ для $P_{\text{вых}}/P_0 = 0,990, 0,980$ и $0,970$ показано на рис. 7.

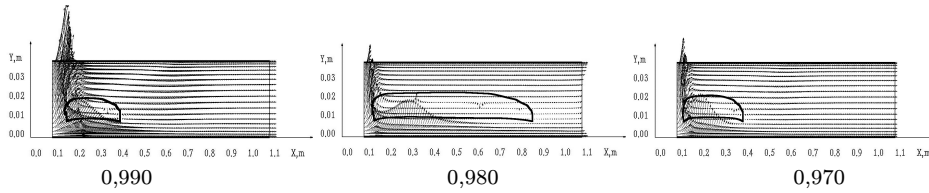


Рис. 7. Поля скоростей: а) $\alpha = 85^\circ$. Отношение давлений $P_{\text{вых}}/P_0 = 0,990, 0,980, 0,970$

В работе получены и представлены для вида закрутки по закону твердого тела ($Cn * \text{tg}(\alpha) * ri/R$), заданного во входном сечении канала, поля скоростей и их фрагменты — структура течений и границы зон отрыва для трех значений отношения давлений $P_{\text{вых}}/P_0 = 0,990, 0,980$ и $0,970$. Поведение потока при всех прочих равных условиях одинаковое. Поля скоростей и распределение параметров (профили относительных окружных и осевых скоростей, давлений, изменение расхода в зависимости от величины угла и т.д.) похожие. Для вынужденного вихря (закон вращения твердого тела) закрутка задается в виде — $Cn * \text{tg}(\alpha) * ri/R$. При $\alpha = 80^\circ$ имеет место диск тороидальной формы в выходном сечении канала. Для всех трех значений отношения давлений $P_{\text{вых}}/P_0 = 0,990, 0,980$ и $0,970$ при $\alpha = 83^\circ$ впервые появляется замкнутая зона возвратного течения, имеющая форму тора ("bagel"), — рис. 7. Тороидальная зона отрыва имеется также при углах закрутки $\alpha = 84^\circ \div 87^\circ$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Годунов С. К., Забродин А. В., Прокопов Г. П. Разностная схема для двумерных нестационарных задач газовой динамики и расчет обтекания с отошедшей ударной волной. — Ж. вычисл. матем. и матем. физ., 1961, т. 1, № 3, с. 1020–1050.
2. Дорфман Л. А. Численные методы в газодинамике турбомашин. Л.: Энергия, 1974.
3. Высотина В. Г. Моделирование течения невязкого газа в осесимметричных каналах с поворотом потока на 180 и 540 градусов. — Математическое моделирование, 1996, т. 8, № 10, с. 25–34.
4. 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, 27, № 78, p. 206–216.
5. Высотина В. Г. Изменение локальных параметров потока воздуха при распаде вихря в трубе. — Обзорение прикл. и промышл. матем., 2015, т. 22, в. 4, с. 450–454.
6. Высотина В. Г. Численное исследование влияния отношений давлений на осесимметричный распад вихря в трубе методом Годунова. — Обзорение прикл. и промышл. матем., 2012, т. 19, в. 2, с. 242–244.
7. Высотина В. Г. Численное исследование структур распада вихря в длинной трубе. — Международная научная конференция по механике «Восьмые Поляховские чтения», 30 января–2 февраля 2018 г. Санкт-Петербург, Россия. Сборник тезисов, с. 103.
8. Гупта А, Лилли Д, Сайред Н. Закрученные потоки. М.: Мир, 1987, 588 с.