

В. Г. В ы с о т и н а (Москва, ТВП). **зависимость структуры течения воздуха в длинной трубе от вида закрутки на входе.**

В работе представлены результаты изучения влияния трех типов закрутки на входе в трубу — постоянный во входном сечении угол, вынужденный вихрь и свободный вихрь на структуру течения воздуха в длинной трубе. При всех прочих равных условиях для трех разных типов закрутки получены решения со структурой содержащей распад вихря. Для расчетов использовался метод Годунова.

Постановка задачи опубликована в [3, 4]. Результаты изучения распада вихря в прямой трубе методом Годунова [1–3] для постоянного во входном сечении угла закрутки α ($\text{tg}(\alpha) = \text{const}$) представлено частично в [5–7], 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 отношения давлений $P_{\text{вых}}/P_0 = 0,990$. На входе задавалась закрутка потока в диапазоне $\alpha = 10^\circ \div 87^\circ$. 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 задавались следующие виды закрутки: $Cn \cdot \text{tg}(\alpha)$, $\alpha = \text{const}$ — для постоянного во входном сечении угла α ; $Cn \cdot \text{tg}(\alpha) \cdot R/(R - r_i)$ — для свободного вихря; $Cn \cdot \text{tg}(\alpha) \cdot r_i/R$ — для вынужденного вихря. Здесь α — угол закрутки ($\alpha = 10^\circ \div 87^\circ$), R — радиус внешнего обвода труба, 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 виду закрутки — (1 — постоянное значение угла закрутки; 2 — свободный вихрь; 3 — вынужденный вихрь), показаны на рис. 1.

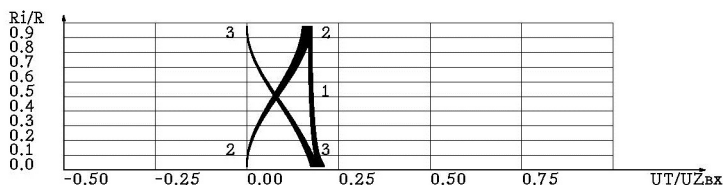


Рис. 1. Графики $UT/UZ_{\text{вх}}$ для угла закрутки $\alpha = 10^\circ$, в сечениях 1–200 с шагом 10. Виды закрутки 1 — $Cn \cdot \text{tg}(\alpha)$, $\alpha = \text{const}$; 2 — $Cn \cdot \text{tg}(\alpha) r_i/R$; 3 — $Cn \cdot \text{tg}(\alpha) R/(R - r_i)$

Графики изменения расхода для каждого вида закрутки в зависимости от угла закрутки α приведены на рис. 2. Течение при вынужденном вихре не имеет случаев отрицательного расхода, тогда как течение при свободном вихре имеет отрицательный расход при углах закрутки от $\alpha = 20^\circ$ до $\alpha = 80^\circ$.

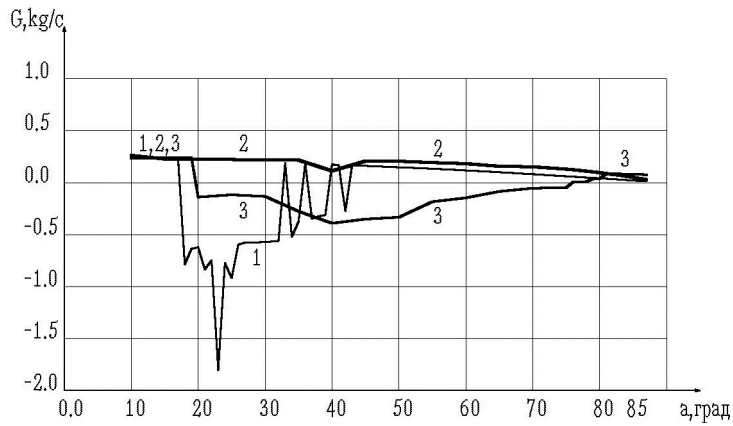


Рис. 2. Расход воздуха в зависимости от угла закрутки на входе α . Виды закрутки 1 — $Cn * \operatorname{tg}(\alpha)$, $\alpha = \operatorname{const}$; 2 — $Cn * \operatorname{tg}(\alpha)ri/R$; 3 — $Cn * \operatorname{tg}(\alpha)R/(R - ri)$

Рассмотрим последовательно каждый из трех типов структуры течения в канале, соответствующие определенному виду закрутки.

1. Для случая постоянного во входном сечении угла закрутки α — $(Cn * \operatorname{tg}(\alpha), \alpha = \operatorname{const})$ — в рассматриваемом канале получены пять вариантов структур закрученного течения. 1) $\alpha = 10^\circ \div 17^\circ$ — закрученный поток без особенностей; 2) $\alpha \approx 18^\circ \div 39^\circ$ — закрученное течение вблизи верхнего обвода канала и сильное обратное приосевое течение (расход отрицательный); 3) $\alpha \approx 40^\circ \div 42^\circ$ — закрученный поток с приосевой зоной отрыва, замкнутой на входе и открытой на выходе из канала (положительный расход); 4) $\alpha \approx 43^\circ \div 50^\circ$ — закрученный поток на периферии и две зоны приосевого отрывного течения — одна замкнутая и вторая — открытая на выходе; 5) $\alpha \approx 50^\circ \div 87^\circ$ — закрученное течение с замкнутой приосевой зоной возвратного течения на входе в канал — распад вихря. Как следует из рис. 3, с увеличением угла закрутки приосевая зона отрыва («bubble») уменьшается в продольных размерах и увеличивается по высоте.

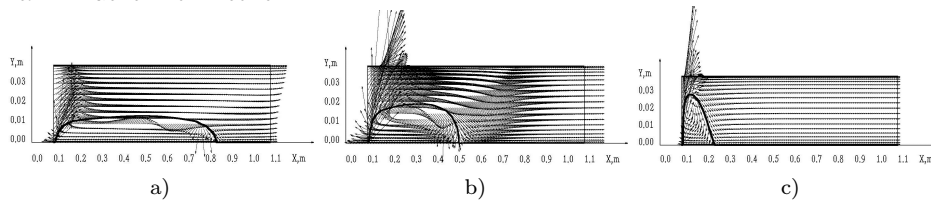


Рис. 3. Поля скоростей: а) $\alpha = 55^\circ$, б) $\alpha = 70^\circ$, в) $\alpha = 87^\circ$.

2. Для случая свободного вихря — $(Cn * R/(R - ri))$ — имеем четыре варианта структур течения. 1) $\alpha = 10^\circ \div 19^\circ$ — закрученное течение без особенностей. 2) $\alpha = 20^\circ \div 80^\circ$ — поток в трубе распадается на закрученное течение вблизи верхнего обвода канала и сильное обратное приосевое течение (расход отрицательный). Изменение поля скоростей при увеличении угла закрутки от $\alpha = 10^\circ$ до $\alpha = 20^\circ$ приведено на рис. 4, где также видно, что равномерное течение при $\alpha = 19^\circ$ перестраивается при $\alpha = 20^\circ$ в 2).

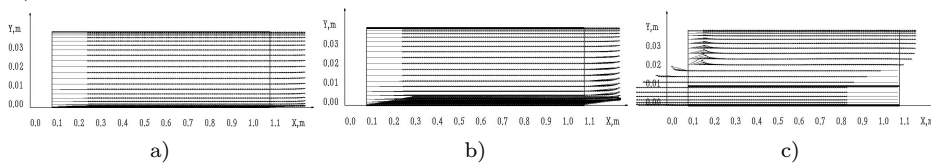


Рис. 4. Поля скоростей: а) $\alpha = 10^\circ$, б) $\alpha = 19^\circ$, в) $\alpha = 20^\circ$.

3) При $\alpha = 81^\circ \div 85^\circ$ закрученный поток имеет положительный расход и приосевую зону отрыва, замкнутую на входе и открытую на выходе из канала.

4) Распад вихря, закрученное течение с замкнутой приосевой зоной возвратного течения, имеет место при $\alpha = 86^\circ \div 87^\circ$. Поля скоростей для случаев 3) и 4) — на рис. 5.

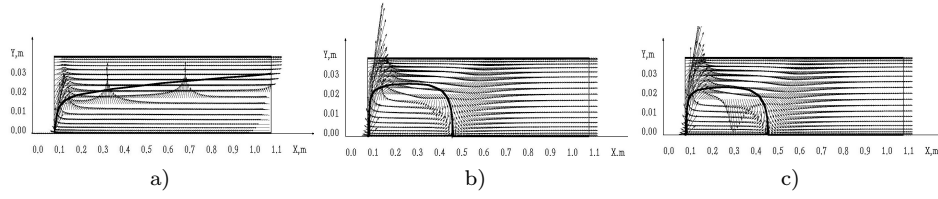


Рис. 5. Поля скоростей: а) $\alpha = 81^\circ$, б) $\alpha = 86^\circ$, в) $\alpha = 87^\circ$.

3. Для случая вынужденного вихря — $(Cn * \operatorname{tg}(\alpha) * ri/R)$, всегда положительный расход, — имеем три варианта структур течения. 1) $\alpha = 10^\circ \div 78^\circ$ — закрученное течение без особенностей. 2) $\alpha = 78^\circ \div 82^\circ$ — перестройка течения. На рис. 6 — изменение полей скоростей от $\alpha = 40^\circ$ до 79° .

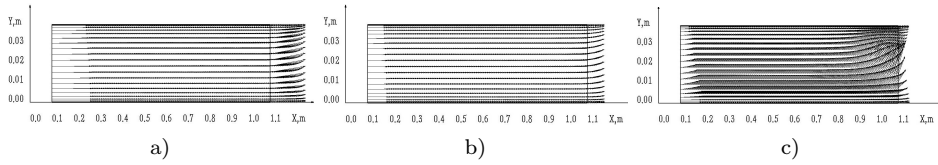


Рис. 6. Поля скоростей: а) $\alpha = 40^\circ$, б) $\alpha = 45^\circ$, в) $\alpha = 79^\circ$.

3) Отличный от первых двух случаев распад вихря — закрученное течение с замкнутой тороидальной зоной («bagel») возвратного течения на входе в канал имеет место быть при $\alpha = 83^\circ \div 87^\circ$. С увеличением угла закрутки тороидальная зона уменьшается в продольных размерах и увеличивается по высоте. Поведение течения при углах закрутки от $\alpha = 83^\circ$ до 87° показано на рис. 7.

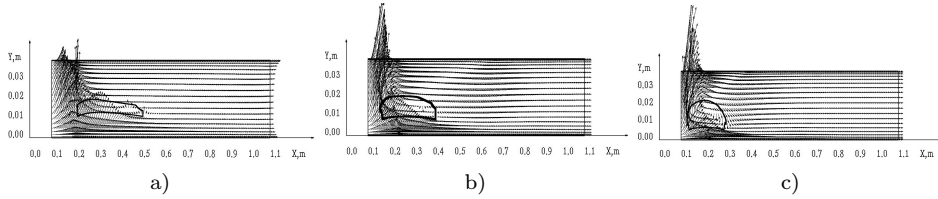


Рис. 7. Поля скоростей: а) $\alpha = 83^\circ$, б) $\alpha = 85^\circ$, в) $\alpha = 87^\circ$.

В работе получены и представлены для трех видов закрутки потока на входе поля скоростей — структура течений и границы зон отрыва. Выяснено, что во всех трех случаях имеет место распад вихря — появление замкнутой зоны возвратного течения наряду с внешним закрученным потоком. Для постоянного во входном сечении угла α — $Cn * \operatorname{tg}(\alpha)$, $\alpha = \operatorname{const}$ — зона возвратного течения («bubble») впервые появляется при $\alpha = 55^\circ$. Для свободного вихря, угол закрутки задается в виде — $Cn * \operatorname{tg}(\alpha) * R/(R - ri)$, — («bubble») впервые появляется при $\alpha = 86^\circ$ (Рис. 4б). Для вынужденного вихря (закон вращения твердого тела) закрутка задается в виде — $Cn * \operatorname{tg}(\alpha) * ri/R$. При $\alpha = 83^\circ$ впервые появляется новый вид распада вихря. Это замкнутая зона возвратного течения, имеющая форму тора («bagel»). При $\alpha = 83^\circ$ появляется впервые, затем уменьшается в продольном размере и увеличивается по радиусу — рис. 7.

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.