

**В. Г. В ы с о т и н а** (Москва, ТВП). **Влияние изменения длины трубы на распад вихря.**

Целью работы является изучение структуры закрученного течения воздуха — распада вихря — в трубах разной длины при прочих равных условиях.

Постановка задачи опубликована в [4]. Другие результаты изучения распада вихря в прямой трубе методом Годунова [1, 3] и сравнение с опытными данными [5] представлено в [6].

Моделирование закрученного течения воздуха выполнено в осесимметричных трубах длиной 1, 2 и 3 метра с радиусом 0,04 м. Используются разностные сетки, состоящие из  $201 \times 21$  (1 метра),  $401 \times 21$  (2 метра),  $601 \times 21$  (3 метра) узлов.

В представленных каналах проведены расчеты течения воздуха для отношения давлений  $P_{\text{вых}}/P_0 = 0,990$ . На входе задавалась закрутка потока в диапазоне  $\alpha = 10^\circ \div 85^\circ$ . Используются следующие параметры торможения:  $P_0 = 1042399,8$  Па;  $\rho_0 = 1,1985$  кг/м<sup>3</sup>;  $\kappa = 1,4$ ;  $R_G = 287,15$  м<sup>2</sup>/(с<sup>2</sup> · К°);  $Re \approx 10^4 - 10^5$ .

Во всех трех каналах получены четыре устойчивых структуры распада вихря, качественно совпадающие. Однако границы перехода из одной структуры в другую при увеличении длины канала изменяются. Закрученное течение без особенностей имеет место для канала длиной 1 метр при изменении углов закрутки на входе от  $10^\circ$  до  $17^\circ$ , для канала длиной 2 метра — при углах закрутки от  $10^\circ$  до  $16^\circ$ , и длиной 3 метра — от  $10^\circ$  до  $14^\circ$ . Поток в трубе распадается на закрученное течение вблизи верхнего обвода канала и сильное обратное приосевое течение (расход отрицательный) в канале длиной 1 метр в диапазоне углов  $18^\circ \div 31^\circ$ , длиной 2 метра — в диапазоне углов  $17^\circ \div 36^\circ$ , длиной 3 метра —  $15^\circ \div 42^\circ$ . При  $\alpha = 15^\circ \div 18^\circ$ , значение расхода изменяется скачком от положительного значения до отрицательного. Обратное изменение расхода, также скачком, происходит при  $\alpha = 31^\circ \div 42^\circ$ .

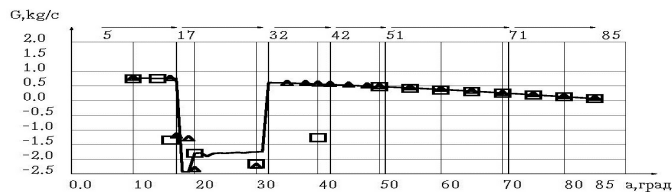


Рис. 1. Расход воздуха  $G$  (кг/с) в зависимости от угла закрутки на входе  $\alpha$ . Отношение давлений  $P_{\text{вых}}/P_0 = 0,990$ . Сплошная линия — для канала  $L = 1,0$  м(1), сетка  $201 \times 21$ .  $\triangle$  — для канала  $L = 2,0$  м, сетка  $401 \times 21$ .  $\square$  — для канала  $L = 2,0$  м, сетка  $601 \times 21$ .

На рис. 1 показано изменение расхода воздуха в трех каналах в зависимости от угла закрутки на входе в канал. Расход воздуха не зависит от длины канала и совпадает для всех углов закрутки, за исключением диапазона углов, при которых имеется сильное сквозное приосевое возвратное течение с отрицательным значением расхода.

Закрученный поток имеет положительный расход и приосевую зону отрыва, замкнутую на входе и открытую на выходе из канала, при углах закрутки  $\alpha = 32^\circ \div 41^\circ$ , (канал 1 м),  $37^\circ \div 44^\circ$ , (канал 2 м),  $44^\circ \div 50^\circ$ , (канал 3 м). Две зоны приосевого отрывного течения — одна замкнутая, и вторая — открытая на выходе, существуют при углах  $42^\circ \div 49^\circ$ , (канал 1 м) и при углах  $44^\circ \div 54^\circ$ , (канал 2 и 3 м). Одновременно имеет место развитый закрученный поток вдоль верхнего обвода канала. Расход положительный. При углах закрутки  $\alpha \geq 50^\circ$  (канал 1 м) и  $\alpha \geq 55^\circ$  (каналы 2 и 3 м) существует структура закрученного течения с замкнутой зоной возвратного течения на входе в канал, которая с увеличением угла закрутки до  $\alpha = 85^\circ$  уменьшается в продольных размерах и увеличивается по высоте. На рис. 2 показаны поля скоростей: для канала длиной 2 метра при  $\alpha = 16^\circ$ , для канала 3 метра — при  $\alpha = 45^\circ$ .

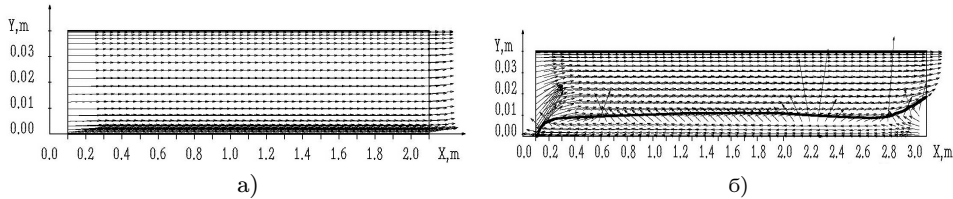


Рис. 2. а) Канал длиной  $L = 2$  метра. Поле скоростей при  $\alpha = 16^\circ$ . Разностная сетка  $401 \times 21$ .  $P_{\text{вых}}/P_0 = 0,990$ . Сгущается по  $M$ . Расход  $G = 0,74980$  кг/с.  
б) Канал длиной  $L = 3$  метра. Поле скоростей  $\alpha = 45^\circ$ . Разностная сетка  $601 \times 21$ .  $P_{\text{вых}}/P_0 = 0,990$ . Сгущается по  $M$ . Расход  $G = 0,51310$  кг/с.

На рис. 3 показана кривая изменения отношения осевой скорости к окружной скорости  $U_Z/UT$  в зависимости от изменения угла закрутки для трех каналов.

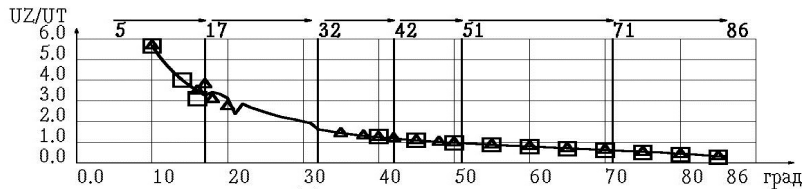


Рис. 3. Отношение скоростей  $U_Z/UT$  в зависимости от изменения угла закрутки на входе а. Равномерные по  $N$  и сгущающиеся по  $M$  разностные сетки. Отношение давлений  $P_{\text{вых}}/P_0 = 0,990$ . Сплошная линия — для канала  $L = 1,0$  м(1), сетка  $201 \times 21$ .  $\Delta$  — для канала  $L = 2,0$  м, сетка  $401 \times 21$ .  $\square$  — для канала  $L = 3,0$  м, сетка  $601 \times 21$ .

Структура закрученного течения с устойчивой возвратно-циркуляционной зоной («пузырем») на входе в канал появляется при отношении скоростей  $U_Z/UT \approx 1$  и углах закрутки  $\alpha \geq 50^\circ \div 55^\circ$ , в диапазоне углов закрутки  $51^\circ \div 85^\circ$ .

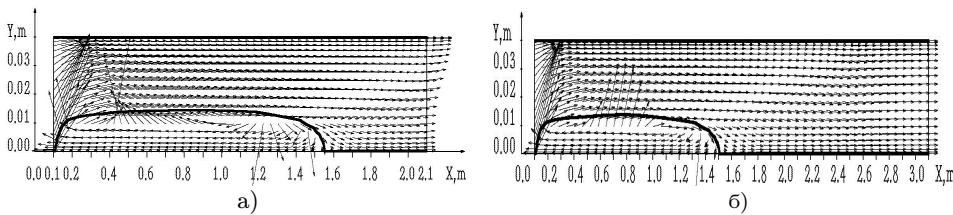


Рис. 4. а) Канал длиной  $L = 2$  метра. Поле скоростей при  $\alpha = 55^\circ$ . Разностная сетка  $401 \times 21$ .  $P_{\text{вых}}/P_0 = 0,990$ . Сгущается по  $M$ . Расход  $G = 0,43360$  кг/с.  
б) Канал длиной  $L = 3$  метра. Поле скоростей  $\alpha = 55^\circ$ . Разностная сетка  $601 \times 21$ .  $P_{\text{вых}}/P_0 = 0,990$ . Сгущается по  $M$ . Расход  $G = 0,4210$  кг/с.

Поле скоростей при  $\alpha = 55^\circ$  в канале длиной 2 метра остается закрученным вне «пузыря» до конца канала, а в канале длиной 3 метра уже при  $\alpha = 55^\circ$  поле скоростей становится прямолинейным и равномерным во второй половине канала вплоть до выхода (рис. 4).

#### 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. 1020–050.
2. Бэтчелор Дж. Введение в динамику жидкости. М.: Мир, 1973.
3. Дорфман Л. А. Численные методы в газодинамике турбомашин. Л.: Энергия, 1974.
4. 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.
5. 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.
6. Высотина В. Г. Изменение локальных параметров потока воздуха при распаде вихря в трубе. — Обозрение прикл. и промышл. матем., 2015, т. 22, в. 4, с. 450–454.
7. Высотина В. Г. Численное исследование влияния отношений давлений на осесимметричный распад вихря в трубе методом Годунова. — Обозрение прикл. и промышл. матем., 2012, т. 19, в. 2, с. 242–244.