

**В. Г. В ы с о т и н а** (Москва, ТВП). **Распад вихря в длинной трубе с переходным участком и расширением.**

Целью работы являлось моделирование распада вихря в длинной трубе, содержащей переходный участок в продолжение трубы с большим диаметром. Задачи изучения течений жидкости в каналах с изменяющейся геометрией, в частности, с внезапным расширением, с выемками, с переходными участками в осесимметричный канал большего или меньшего диаметра и т. д. рассматриваются, например, в [2, 4]. Изучение структуры закрученного течения в таких каналах интересно тем, что, как геометрические параметры канала, так и закрутка потока могут являться причиной появления зон возвратно-циркуляционного течения в приосевой или в приграничной области. Постановка задачи опубликована в [5]. Результаты изучения распада вихря в прямой трубе методом Годунова [1, 3] и сравнение с опытными данными [6] представлено в [7].

Моделирование закрученного течения воздуха выполнено в осесимметричной трубе длиной 1 м. Труба состоит из трех участков: входной участок — длина 0,55 м и радиус 0,038 м, переходный расширяющийся участок — длину 0,20 м (от 0,55 м до 0,75 м), и выходной участок длина 0,25 м радиус 0,04 м. Геометрия канала и разностная сетка ( $201 \times 21$  ячейки) представлены на рис. 1.

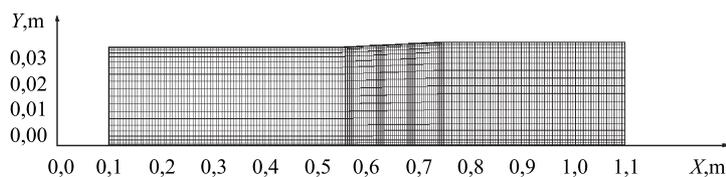


Рис. 1. Геометрия осесимметричного канала с переходным участком. Разностная сетка  $201 \times 21$  ячейки равномерная по длине и сгущающаяся по высоте к оси и внешнему обводу канала

В представленном канале проведены расчеты течения воздуха для отношения давлений  $P/P_0 = 0,900$ . На входе задавалась закрутка потока  $\alpha = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ$ . Используются следующие параметры торможения:  $P_0 = 1042399,8$  Па;  $\rho_0 = 1,1985$  кг/м<sup>3</sup>;  $k = 1,4$ ;  $R_G = 287,15$  м<sup>2</sup>/(с<sup>2</sup>·К°);  $Re \approx 10^4 - 10^5$ .

На рис. 2 показана структура течения воздуха для случая с закруткой  $\alpha = 0^\circ, 10^\circ$  — поле скоростей в осесимметричном канале с переходным участком и распределение статического давления вдоль канала. Распределение давления имеет два излома в местах начала и конца переходного участка  $x = 0,4$  м и  $0,65$  м. Уменьшение давления (отрицательный градиент) имеется от начала входного участка и на переходном участке до минимального значения  $P_i/P_0 = 0,8900$ . Затем происходит повышение давления (положительный градиент) до заданного значения на выходе  $P_{\text{вых}}/P_0 = 0,900$ .

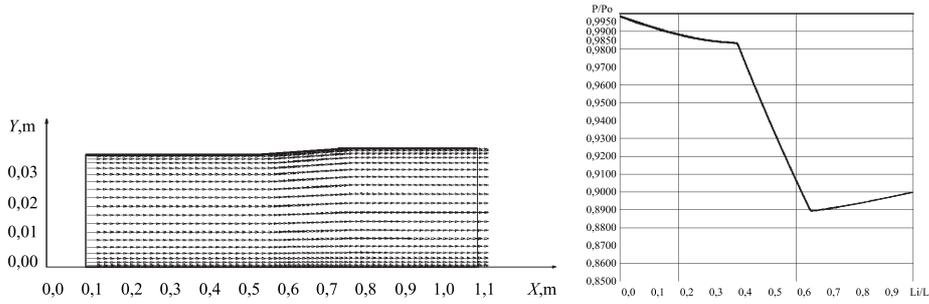


Рис. 2. Поле скоростей и статическое давление вдоль длины канала. Закрутка  $\alpha = 10^\circ$ . Расход  $G = 0,2620$  кг/сек.

На рис. 3 представлено поле скоростей закрученного течения воздуха в расширяющемся канале и распределение осевой составляющей скорости  $UZ_i/UZ_{\text{вх.ср}}$  вдоль канала при закрутке на входе  $\alpha = 30^\circ$ . Этот случай интересен тем, что, если в прямом канале возвратная зона впервые появляется при значениях закрутки  $\alpha \geq 45^\circ$  [8] для разных значений отношений давления  $P_{\text{вых}}/P_0$ , то в расширяющемся канале с переходным участком «пузырь» появился при  $\alpha = 30^\circ$  и  $P_{\text{вых}}/P_0 = 0,900$ . Подтверждение этому — отрицательные значения  $UZ_i/UZ_{\text{вх.ср}}$  на графике распределения осевой скорости вдоль длины канала.

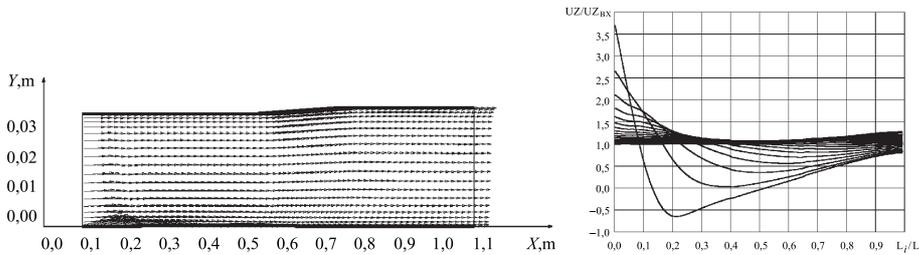


Рис. 3. Поле векторов скорости закрученного течения воздуха ( $\alpha = 30^\circ$ ) в расширяющемся канале с переходным участком. Зона возвратного течения («пузырь»), и распределение осевой составляющей скорости вдоль длины канала при  $P_{\text{вых}}/P_0 = 0,900$ .  $UZ_{\text{вх}} = 43,97$  м/с. Расход  $G = 0,260$  кг/сек.

В диапазоне рассмотренных углов закрутки  $\alpha = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ$ , во всех случаях углов закрутки при  $\alpha \geq 30^\circ$  имеет место замкнутая зона возвратного течения на входе в канал, которая является результатом распада вихря, положительного градиента статического давления на входе, возникающего вследствие закрутки потока на входе. На рис. 4 представлено поле скоростей закрученного течения воздуха при  $\alpha = 40^\circ$ . Замкнутая зона возвратного течения имеет длину  $\approx 0,5$  м и не распространяется вверх по потоку при увеличении значения угла закрутки. График распределения статического давления изменился: на входном участке теперь имеет место быть положительный градиент давления — следствие закрутки потока на входе. На переходном участке поведение давления не изменилось — сохранился отрицательный градиент до значения  $P_i/P_0 = 0,9050$ . На выходном участке давление поменяло положительный градиент, имеющий место при  $\alpha = 0^\circ, 10^\circ$  на отрицательный.

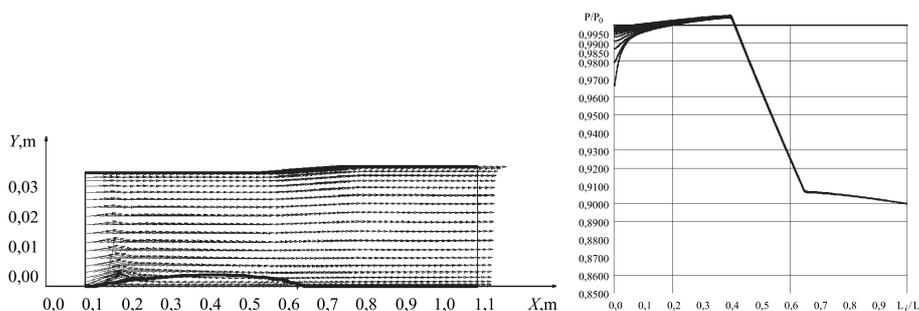


Рис. 4. Поле векторов скорости закрученного течения воздуха (угол закрутки  $\alpha = 40^\circ$ ) в расширяющемся канале с переходным участком, зона возвратного течения, и распределение статического давления вдоль длины канала при  $P_{\text{вых}}/P_0 = 0,900$ . Расход  $G = 0,2450$  кг/сек.

Расход воздуха незначительно уменьшался при изменении угла закрутки от  $\alpha = 0^\circ$  до  $\alpha = 20^\circ$ , и был равен соответственно  $G = 0,2750$  кг/с при  $\alpha = 0^\circ$ ,  $G = 0,2630$  кг/с при  $\alpha = 10^\circ$  и  $G = 0,2580$  кг/с при  $\alpha = 20^\circ$ . После появления «пузыря», расход при  $\alpha = 30^\circ$  незначительно увеличился до значения  $G = 0,2650$  кг/с при  $\alpha = 30^\circ$  и затем снова уменьшался: при  $\alpha = 40^\circ$  расход  $G = 0,2450$  кг/с, при  $\alpha = 50^\circ$  расход  $G = 0,2150$  кг/с и при  $\alpha = 53^\circ$  расход  $G = 0,1960$  кг/с. При практически постоянном осевом размере замкнутой зоны отрыва, высота «пузыря» увеличилась незначительно до значения 0,008 м при  $\alpha = 50^\circ, 53^\circ$ . Во всех случаях при увеличении значения угла закрутки имеет место положительный градиент давления на входе.

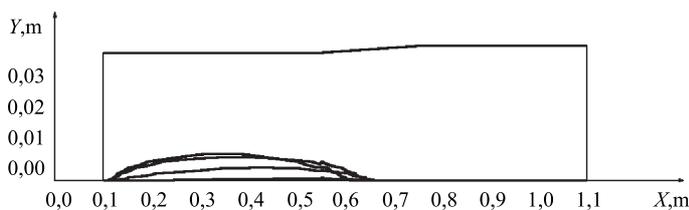


Рис. 5. Границы зон возвратного течения при углах закрутки на входе  $\alpha = 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 53^\circ$  в расширяющемся канале с переходным участком к при  $P_{\text{вых}}/P_0 = 0,900$ .

В результате моделирования распада вихря в длинной расширяющейся трубе с переходным каналом выяснилось, что появление «пузыря» в закрученном течении воздуха (распад вихря) возможно при отношении давлений  $P_{\text{вых}}/P_0 = 0,900$  и углах закрутки  $\alpha = 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 53^\circ$ . Наличие переходного участка в расширяющемся канале способствует более раннему появлению «пузыря», а именно при  $\alpha = 30^\circ$ .

Вопрос изучения закрученного течения с «пузырем» в каналах с изменяющейся геометрией требует дальнейшего исследования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Годунов С.К. и др. — ЖВМ и МФ, 1961, т. 1, № 3, с. 1020–1050.
2. Бэтчелор Дж. Введение в динамику жидкости. М.: Мир, 1973.
3. Дорфман Л. А. Численные методы в газодинамике турбомашин. Л.: Энергия, 1974.
4. Гупта А., Лилли Д., Сайред Н. Закрученные потоки. М.: Мир, 1987, 588 с.
5. Высотина В. Г. Ж. Математическое моделирование, 2001, т. 13, № 10, с. 103–119.

6. *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.
7. *Высотина В. Г.* Изменение локальных параметров потока воздуха при распаде вихря в трубе. — *Обзорные прикл. и промышл. матем.*, 2015, т. 22, в. 4, с. 450–454.
8. *Высотина В. Г.* Численное исследование влияния отношений давления на осесимметричный распад вихря в трубе методом Годунова. — *Обзорные прикл. и промышл. матем.*, 2012, т. 19, в. 2, с. 242–244.