

В. Г. В ы с о т и н а (Москва, ОПиПМ). **Структура закрученного течения воздуха в длинной трубе в зависимости от двух типов закрутки.**

УДК

Резюме: Представлены результаты изучения и сравнение двух видов структуры закрученного течения воздуха в длинной трубе, полученных при задании закрутки на входе в трубу по закону вынужденного вихря и в виде ломаной линии: Показано, что задание таких типов закрутки приводит к получению подобных структур закрученного течения, содержащих «распад вихря». Углы закрутки на входе варьировались в диапазоне $10^\circ \div 87^\circ$. Для всех численных решений условия задачи сохранялись неизменными. Использовался метод Годунова.

Ключевые слова: воздух, распад вихря, закрутка, структура, постоянный угол закрутки α , закон закрутки твердого тела (вынужденный вихрь), закон закрутки в виде ломаной линии, длинная труба, метод Годунова.

В работе представлены результаты изучения изменения структуры закрученного течения в длинной трубе, полученного при задании закрутки на входе в трубу по закону вынужденного вихря и в виде ломаной линии: При всех прочих равных условиях для двух типов закрутки при значении отношения давлений $P_{\text{вых}}/P_0 = 0,990$ в диапазоне изменения угла закрутки $\alpha = 10^\circ \div 87^\circ$ получены подобные решения со структурой, содержащей распад вихря в виде тороидальной зоны отрыва, обтекаемой закрученным основным потоком. Для расчетов использовался метод Годунова [1,2,3].

Постановка задачи опубликована в [1–3]. Моделирование закрученного течения воздуха выполнялось в осесимметричной трубе длиной 1 метр с радиусом 0,04 м [4]. Использована разностная сетка равномерная по длине и сгущающаяся к оси и внешнему обводу по радиусу, состоящая из 201×21 узлов.

Результаты изучения распада вихря в прямой трубе для постоянного во входном сечении угла закрутки ($C_n * \text{tg}(\alpha) = \text{const}$, представлены частично в [5–8], там же представлено сравнение с опытными данными [4].

Результаты изучения влияния трех типов закрутки на входе в трубу: постоянный во входном сечении угол, вынужденный вихрь ($C_n * \text{tg}(\alpha) * r_i/R$), свободный вихрь ($C_n * \text{tg}(\alpha) * R/(R - r_i)$), на структуру течения воздуха в длинной трубе приведены в [9,10]. Там же показаны, полученные при всех прочих равных условиях, и в частности, при законе твердого тела, решения со структурой содержащей распад вихря в виде замкнутой тороидальной зоны для трех разных значений отношения давлений $P_{\text{вых}}/P_0 = 0,990, 0,980, 0,970$ [10].

В данной работе представлены результаты расчетов течения воздуха для отношения давлений $P_{\text{вых}}/P_0 = 0,990$, для заданного во входном сечении типа закрутки в виде ломаной линии $C_n * [(r_1 - r_3) = 0, 0; (r_3 - r_8) = 0, 0 - \text{tg}(a); (r_8 - r_{19}) = \text{tg}(a); (r_{19} - r_{20}) = 0, 0]$, где C_n — нормальная к входному сечению скорость. Выполнено сравнение структур закрученного течения, полученных для типа закрутки в виде ломаной линии, со структурами течения при закрутке потока по закону твердого тела в диапазоне углов $\alpha = 10^\circ \div 87^\circ$. Используются следующие параметры торможе-

ния: $P_0 = 100500$, 8Па; $\rho_0 = 1,1945$ кг/м³; $\kappa = 1,4$; $RG = 287,15$ м²/(2 · К°); $Re \approx 10^4 - 10^5$.

Для примера на рис. 1 показаны линии типов закрутки во входном сечении канала для заданного угла $\alpha = 80^\circ$: 1 — постоянный угол закрутки, 2 — вынужденный вихрь, 4 — ломаная линия.

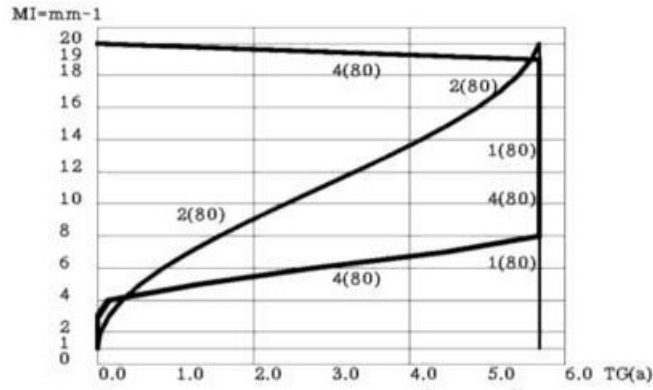


Рис. 1. Типы закрутки во входном сечении канала для заданного угла $\alpha = 80^\circ$. 1 — $C_n * \text{tg}(\alpha)$, $\text{tg}(\alpha) = \text{const} = 5,67$. 2 — $C_n * \text{tg}(\alpha) * r(m)/R$ — вынужденный вихрь. 4 — $C_n * [(r_1 - r_3) = 0,0; (r_3 - r_8) = 0,0 - \text{tg}(\alpha); (r_8 - r_{19}) = \text{tg}(\alpha); (r_{19} - r_{20}) = 0,0]$ — ломаная линия. C_n — нормальная к входному сечению скорость.

Поведение потока при всех прочих равных условиях при задании закрутки во входном сечении в виде ломаной линии и в виде вынужденного вихря для значения отношения давлений $P_{\text{вых}}/P_0 = 0,990$ похожее: в зависимости от изменения угла закрутки α всегда имеем положительный расход и три варианта структур течения. На рис. 2 показаны поля скоростей без особенностей: для типа закрутки «ломаная линия» при $\alpha = 40^\circ$ и типа закрутки вынужденный вихрь при $\alpha = 60^\circ$.

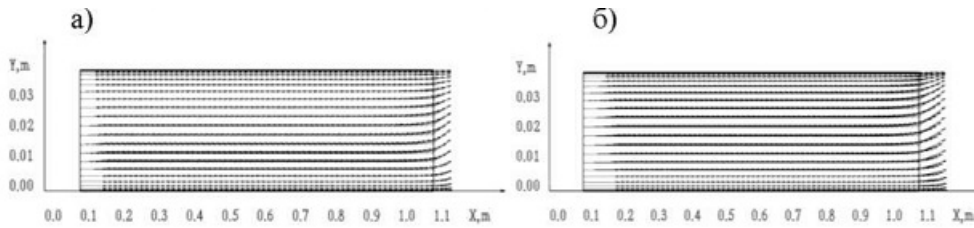


Рис. 2. Поля скоростей: а) $\alpha = 40^\circ$, вид закрутки — ломаная линия; б) $\alpha = 60^\circ$, вид закрутки — вынужденный вихрь. Отношение давлений $P_{\text{вых}}/P_0 = 0,990$.

Однако, для закрутки в виде ломаной линии закрученное течение не имеет особенностей в диапазоне углов закрутки $\alpha = 10^\circ \div 60^\circ$, для вынужденного вихря этот диапазон $\alpha = 10^\circ \div 79^\circ$. При $\alpha = 60^\circ$ (ломаная линия) и $\alpha = 79^\circ$ (вынужденный вихрь) расходы воздуха соответственно равны $G = 0,128$ кг/с и $0,130$ кг/с.

При $\alpha = 61^\circ$ (тип закрутки «ломаная линия») и $\alpha = 80^\circ$ (тип закрутки вынужденный вихрь) в выходном сечении канала имеет место наличие диска тороидальной формы. Поля скоростей и фрагменты полей течений, имеющие в выходном сечении диск, показаны на рис. 3 и 4.

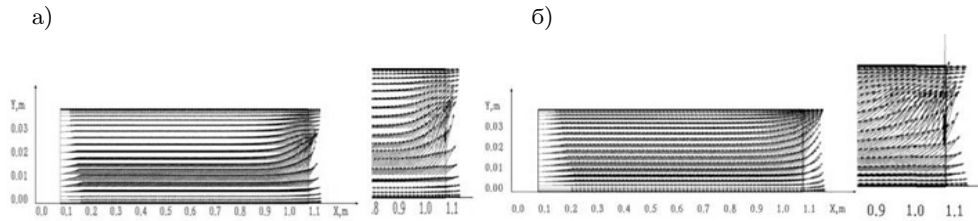


Рис. 3. а) угол закрутки $\alpha = 61^\circ$, вид закрутки — ломаная линия; б) угол закрутки $\alpha = 80^\circ$, вид закрутки — вынужденный вихрь.

Перестройка течения происходит для типа закрутки вынужденный вихрь при углах $\alpha = 80^\circ \div 82^\circ$. Для типа закрутки «ломаная линия» — при углах $\alpha = 61^\circ \div 81^\circ$.

Для постоянного во входном сечении угла $\alpha - C_n * \text{tg}(\alpha)$, $\alpha = \text{const}$ — зона возвратного течения (“bubble”) впервые появляется при $\alpha = 55^\circ$. Для вынужденного вихря (закон вращения твердого тела) закрутка задается в виде $C_n * \text{tg}(\alpha) * r_i/R$ и замкнутая зона возвратного течения, имеющая форму тора, появляется впервые при $\alpha = 83^\circ$. Для типа закрутки «ломаная линия», которая задается в виде отрезков прямых $C_n * [(r_1 - r_3) = 0, 0; (r_3 - r_8) = 0, 0 - \text{tg}(\alpha); (r_8 - r_{19}) = \text{tg}(\alpha); (r_{19} - r_{20}) = 0, 0]$, замкнутая тороидальная зона впервые появляется при $\alpha = 82^\circ$. Поля скоростей представлены на рис. 4.

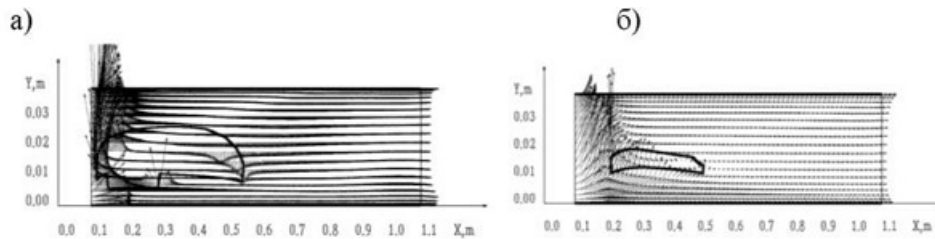


Рис. 4. Поля скоростей после перестройки течения, имеющие зону отрыва в виде тора а) угол закрутки $\alpha = 82^\circ$, вид закрутки — ломаная линия; б) угол закрутки $\alpha = 83^\circ$, вид закрутки — вынужденный вихрь.

Для закрутки по закону твердого тела распад вихря в виде закрученного течения с замкнутой тороидальной зоной (“bagel”) имеет место в диапазоне углов $\alpha = 83^\circ \div 87^\circ$. Для типа закрутки в виде ломаной линии замкнутая тороидальная зона отрыва имеется при углах закрутки $\alpha = 82^\circ \div 87^\circ$. На рис. 5 показаны фрагменты полей скоростей для угла закрутки $\alpha = 85^\circ$, содержащие зону отрыва в виде тора для обоих случаев закрутки.

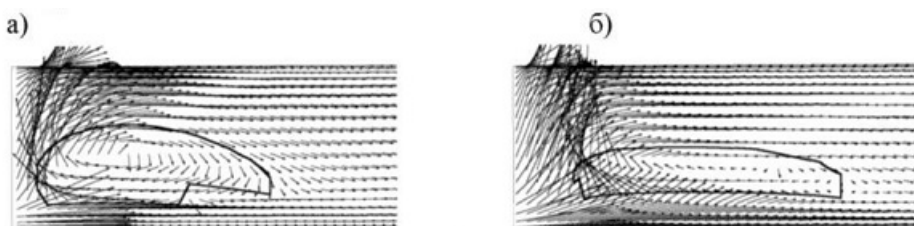


Рис. 5. Фрагменты полей скоростей, имеющие зону отрыва в виде тора а) угол закрутки $\alpha = 85^\circ$, вид закрутки — ломаная линия; б) угол закрутки $\alpha = 85^\circ$, вид закрутки — вынужденный вихрь.

На рис. 6 показано сравнение схематического изображения кольцевой закрученной струи в горелке, где показаны линии тока воздушного потока, стабилизирующего нефтяное пламя, содержащее подобного типа замкнутую тороидальную зону [11, с. 34], с полученными в данной работе зонами отрыва в виде тора.

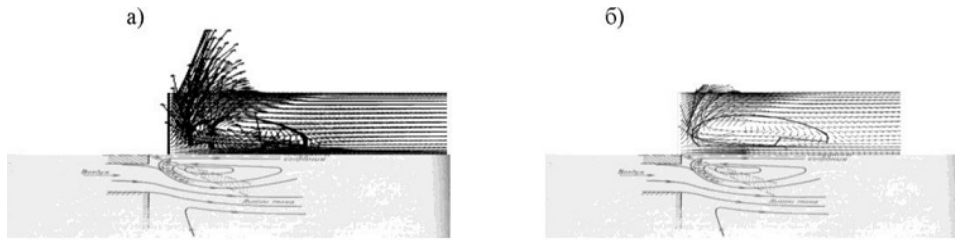


Рис. 6. Сравнение схемы с результатом расчета, угол закрутки $\alpha = 85^\circ$: а) вид закрутки — вынужденный вихрь; б) вид закрутки — ломаная линия.

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. Uchida S., Nakamura Y., Ohsawa M. Experiments on the axisymmetric vortex breakdown in a swirling air flow. — Trans. Japan Soc. Aeronaut. Space Sci., 1985, v. 27, № 78, p. 206–216.
5. Высотина В. Г. О моделировании осесимметричного распада вихря в трубе методом Годунова. — Обозрение прикл. и промышл. матем., 2014, т. 21, в. 1, с. 47–49.
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.
8. 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.
9. Высотина В. Г. Зависимость структуры течения воздуха в длинной трубе от вида закрутки на входе. — Обозрение прикл. и промышл. матем., 2020, т. 26, в. 1, с. 67–71.
10. Высотина В. Г. Особенности структуры закрученного по закону твердого тела (вынужденный вихрь) течения воздуха в длинной трубе. — Обозрение прикл. и промышл. матем., 2019, том 26, вып. 3, с. 257–259.
11. Гупта А., Лилли Д., Сайред Н. Закрученные потоки. М.: Мир, 1987, 588 с.

UDC

Vysotina V. G. (Moscow, Review of applied and industrial mathematics). **The dependence of the flow structure inside the long pipe from the two types of swirling at the entrance**

Abstract: The two types of swirling flows as forced vortex motion and motion like zigzag were set on at entrance in the long pipe. The comparison was made for these solutions which were received for two types of swirling flows that determine the flow through the pipe. The two structures of the “vortex breakdown” were similar and consist of the similar types of swirling structures. The swirl angles were changed from 10° to 87° . For all solutions were retained similar conditions. Godunov’s method was used for investigation.

Keywords: air, vortex breakdown, swirling, structure, constant angle α forced vortex motion, motion like zigzag, long pipe, Godunov’s method.