

В. Г. В ы с о т и н а (Москва, ОПиПМ). **Преобразование структуры распада вихря в длинной трубе, используя изменение вида закрутки на входе.**

УДК 533

Резюме: Два вида закрутки, постоянный угол закрутки α и кусочно-линейная функция, задавались во входном сечении длинной трубы. Углы закрутки изменялись в диапазоне $10^\circ \div 85^\circ$. Для получения всех численных решений использовался метод Годунова и сохранялись неизменные условия задачи, Сравнение решений, полученных для двух видов закрутки, показало наличие двух различных структур закрученного течения, имеющих распад вихря. При задании закрутки в виде постоянного угла α получены закрученные течения, содержащие зоны отрыва в форме «пузырей». При задании закрутки в виде кусочно-линейной функции (зигзаг) закрученные течения содержат зоны возвратно-циркуляционного течения в виде осесимметричного тора. Диапазон устойчивого ламинарного закрученного течения при такой закрутке существенно увеличивается.

Ключевые слова: воздух, распад вихря, закрутка, структура, постоянный угол закрутки, закон закрутки в виде кусочно-линейной функции — зигзаг, длинная труба, метод Годунова.

В работе представлены результаты численного изучения закрученного потока воздуха в длинной трубе, полученные при задании двух видов закрутки на входе в трубу. Рассмотрен случай задания закрутки $C_n \operatorname{tg}(a) = \operatorname{const}$, т.е. постоянное значение по высоте входного сечения канала, и тип закрутки в виде ломаной линии $C_n[(r_1 - r_3) = 0.0; (r_3 - r_8) = 0.0 - \operatorname{tg}(a); (r_8 - r_{19}) = \operatorname{tg}(a); (r_{19} - r_{20}) = 0.0]$. Здесь α угол закрутки, а C_n — нормальная к входному сечению скорость.

При всех прочих равных условиях для двух типов закрутки получены решения при значении отношения давлений $P_{\text{вых}}/P_0 = 0,990$ в диапазоне изменения угла закрутки $\alpha = 10^\circ \div 85^\circ$. 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]. Применена разностная сетка равномерная по длине и сгущающаяся к оси и внешнему обводу по радиусу, состоящая из 201×21 узлов. Используются параметры торможения:

$P_0 = 100500,8$ Па; $\rho_0 = 1,1945$ кг/м³; $\kappa = 1,4$; $Rg = 287,15$ м²/(с² · °K); $Re \approx 10^4 - 10^5$.

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

Линии типов закрутки во входном сечении канала для заданных углов $\alpha = 50^\circ, 80^\circ, 85^\circ$ показаны на рис. 1. Здесь 1 — постоянный угол закрутки $C_n \operatorname{tg}(\alpha) = \operatorname{const}$, 2 — $C_n \operatorname{tg}(\alpha) =$ ломаная линия.

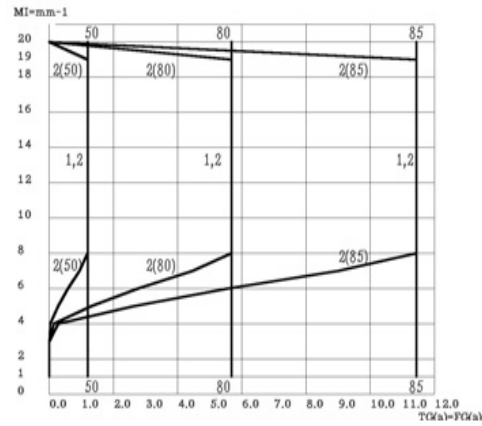


Рис. 1. Типы закрутки во входном сечении канала для заданного угла $\alpha = 80^\circ, 80^\circ, 85^\circ$. 1 — $C_n \operatorname{tg}(\alpha), \operatorname{tg}(\alpha) = \operatorname{const}$. 2 — $C_n[(r_1 - r_3) = 0, 0; (r_3 - r_8) = 0, 0 - \operatorname{tg}(\alpha); (r_8 - r_{19}) = \operatorname{tg}(\alpha); (r_{19} - r_{20}) = 0, 0]$ — ломаная линия. C_n — нормальная к входному сечению скорость.

На рис. 2 показаны кривые распределения расхода в канале в зависимости от угла закрутки для двух типов закрутки на входе: 1 $\operatorname{tg}(\alpha) = \operatorname{const}$ и 2 $\operatorname{tg}(\alpha) = \operatorname{zigzag}$ (ломаная линия).

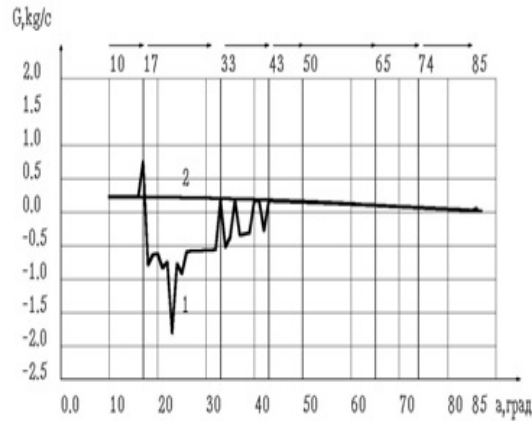


Рис. 2. Расход воздуха G (кг/сек) в зависимости от угла закрутки α на входе. Типы закрутки во входном сечении канала 1 — $C_n \operatorname{tg}(\alpha), \operatorname{tg}(\alpha) = \operatorname{const}$. 2 — $C_n[(r_1 - r_3) = 0, 0; (r_3 - r_8) = 0, 0 - \operatorname{tg}(\alpha); (r_8 - r_{19}) = \operatorname{tg}(\alpha); (r_{19} - r_{20}) = 0, 0]$ — ломаная линия. C_n — нормальная к входному сечению скорость.

Рис. 2 показывает, что в диапазоне углов закрутки $\alpha = 17^\circ \div 33^\circ$ для типа закрутки $\operatorname{tg}(\alpha) = \operatorname{const}$ имеют место отрицательные значения расхода. В диапазоне углов $\alpha = 34^\circ \div 43^\circ$ кривая расхода отличается неустойчивостью. Кривая распределения расхода G для типа закрутки $\operatorname{tg}(\alpha) = \operatorname{zigzag}$ (ломаная линия) во всем диапазоне углов закрутки особенностей не имеет.

На рис. 3 приведены кривые изменения среднего по потоку значения завихренности $W_\theta = \partial C_r / \partial z - \partial C_z / \partial r$ в зависимости от угла закрутки α на входе для двух типов закрутки: 1 — $\operatorname{tg}(\alpha) = \operatorname{const}$ и 2 — $\operatorname{tg}(\alpha) = \operatorname{zigzag}$ (ломаная линия).

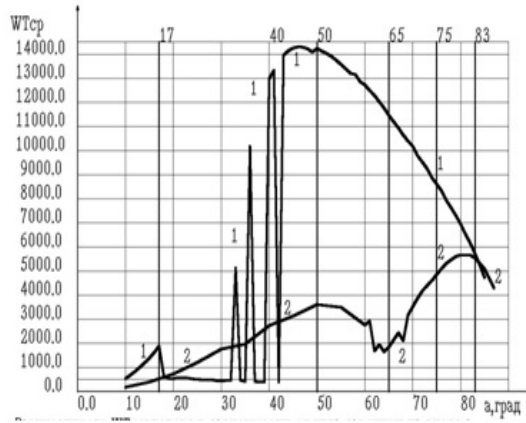


Рис. 3. Завихренность $W_{\theta_{cp}}$ (1/сек) в зависимости от угла закрутки α на входе. Типы закрутки во входном сечении канала 1 — $C_n \operatorname{tg}(\alpha)$, $\operatorname{tg}(\alpha) = \operatorname{const}$. 2 — $C_n[(r_1 - r_3) = 0, 0; (r_3 - r_8) = 0, 0 - \operatorname{tg}(\alpha); (r_8 - r_{19}) = \operatorname{tg}(\alpha); (r_{19} - r_{20}) = 0, 0]$ — ломаная линия. C_n — нормальная к входному сечению скорость.

На рис. 3 видно, что в диапазоне углов закрутки $\alpha = 17^\circ \div 33^\circ$ для типа закрутки $\operatorname{tg}(\alpha) = \operatorname{const}$ имеют место очень низкие значения завихренности W_θ . В диапазоне углов $\alpha = 34^\circ \div 43^\circ$ кривая завихренности W_θ отличается неустойчивостью. Кривая распределения завихренности W_θ для типа закрутки $\operatorname{tg}(\alpha) = \text{zigzag}$ (ломаная линия) особенностей не имеет во всем диапазоне углов закрутки.

На рис. 4 показаны поля скоростей при $\alpha = 10^\circ$ для типа закрутки $\operatorname{tg}(\alpha) = \operatorname{const}$ и для типа закрутки «ломаная линия» $\alpha = 10^\circ$. Поля скоростей представляют собой течения без особенностей.

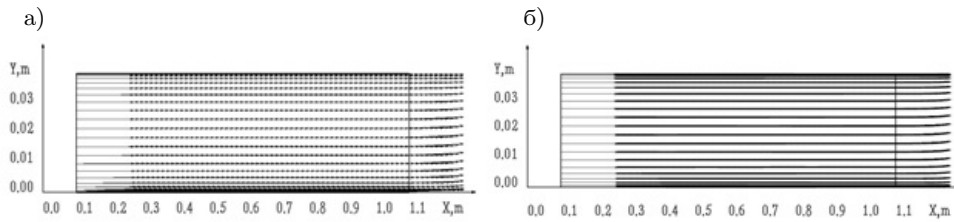


Рис. 4. Поля скоростей: а) $\alpha = 10^\circ$, вид закрутки $\operatorname{tg}(\alpha) = \operatorname{const}$; б) $\alpha = 10^\circ$, вид закрутки — «ломаная линия».

На рис. 5 показаны поля скоростей при $\alpha = 17^\circ$ для типа закрутки $\operatorname{tg}(\alpha) = \operatorname{const}$ и при $\alpha = 15^\circ$ для типа закрутки «ломаная линия». Поле скоростей при $\alpha = 17^\circ$ для типа закрутки $\operatorname{tg}(\alpha) = \operatorname{const}$ имеет особенности течения вблизи оси канала. Во втором случае, для типа закрутки «ломаная линия» при $\alpha = 15^\circ$ поле скоростей представляет собой течение без особенностей.

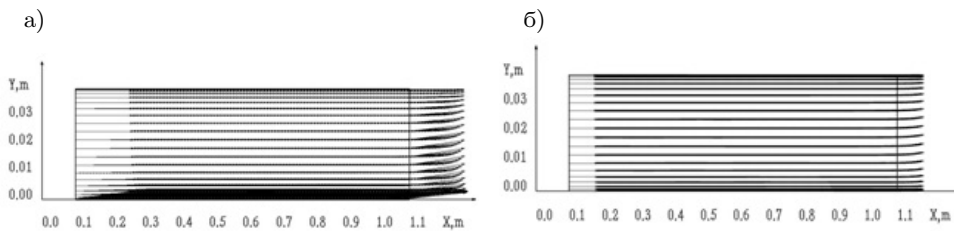


Рис. 5. Поля скоростей: а) $\alpha = 17^\circ$, вид закрутки $\operatorname{tg}(\alpha) = \operatorname{const}$; б) $\alpha = 15^\circ$, вид закрутки — «ломаная линия».

Для типа закрутки $\text{tg}(\alpha) = \text{const}$ в диапазоне углов $\alpha = 17^\circ \div 33^\circ$ имеют место течения с отрицательными значениями расхода. На рис. 6 показаны поля скоростей при углах закрутки $\alpha = 20^\circ$ для типа закрутки $\text{tg}(\alpha) = \text{const}$, имеющие сквозное возвратное течение, и для типа закрутки «ломаная линия».

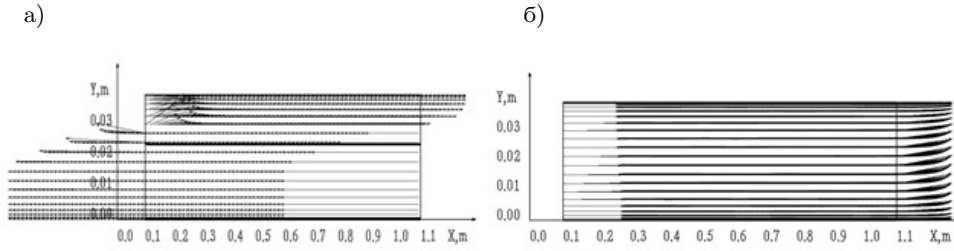


Рис. 6. Поля скоростей: а) $\alpha = 20^\circ$, вид закрутки $\text{tg}(\alpha) = \text{const}$; б) $\alpha = 20^\circ$, вид закрутки — «ломаная линия».

Поля скоростей, приведенные на рис. 6, показывают, что изменение типа закрутки $\text{tg}(\alpha) = \text{const}$ на тип закрутки «ломаная линия» при прочих равных условиях позволило получить течения без сквозных зон возвратного течения и отрицательного расхода.

В диапазоне углов закрутки $\alpha = 33^\circ \div 43^\circ$ для типа закрутки $\text{tg}(\alpha) = \text{const}$ имеют место течения с положительным расходом, но имеющие особенности, а именно, течения с открытой зоной возвратного течения. На рис. 7 показано при угле закрутки $\alpha = 40^\circ$ поле скоростей, имеющее открытую зону возвратного течения, для типа закрутки $\text{tg}(\alpha) = \text{const}$, и соответствующее поле скоростей для типа закрутки «ломаная линия».

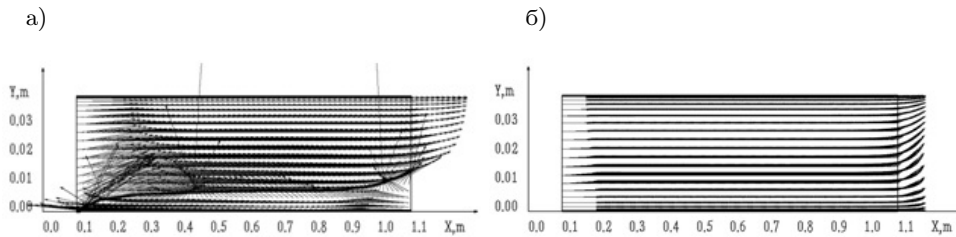


Рис. 7. Поля скоростей: а) $\alpha = 40^\circ$, вид закрутки $\text{tg}(\alpha) = \text{const}$; б) $\alpha = 40^\circ$, вид закрутки — «ломаная линия».

Изменение вида закрутки $\text{tg}(\alpha) = \text{const}$ на вид закрутки «ломаная линия» позволило получить течение без открытой зоны возвратного течения, имеющей место при $\alpha = 40^\circ$ для вида закрутки $\text{tg}(\alpha) = \text{const}$.

В диапазоне углов закрутки $\alpha = 43^\circ \div 60^\circ$ для типа закрутки $\text{tg}(\alpha) = \text{const}$ имеют место течения с положительным расходом и двумя зонами возвратного течения, замкнутой и открытой. Замкнутая возвратно-циркуляционная зона представляет собой «пузырь», в котором циркулирует отделенная от основного закрученного течения масса воздуха. Открытая возвратная зона — это воздух, втекающий в канал через выходное сечение канала и вытекающий вместе с основным закрученным потоком. Поля скоростей для угла $\alpha = 50^\circ$ для обоих видов закрутки показаны на рис. 8.

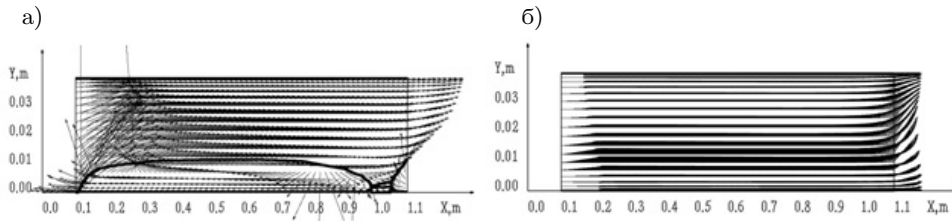


Рис. 8. Поля скоростей: а) $\alpha = 50^\circ$, вид закрутки $\text{tg}(\alpha) = \text{const}$; б) $\alpha = 50^\circ$, вид закрутки — «ломаная линия».

Изменение вида закрутки $\text{tg}(\alpha) = \text{const}$ на вид закрутки «ломаная линия» позволило получить течение без зон возвратного течения.

Вывод: в диапазоне углов закрутки $\alpha = 10^\circ \div 60^\circ$ для закрутки в виде ломаной линии поля скоростей не имеют возвратных зон. На рис. 9 представлены поля скоростей для угла закрутки $\alpha = 61^\circ$. Для вида закрутки $\text{tg}(\alpha) = \text{const}$ имеется течение с положительным расходом и замкнутой возвратно-циркуляционной зоной — «пузырем». Для закрутки в виде ломаной линии закрученное течение при $\alpha = 61^\circ$ имеет в выходном сечении канала диск тороидальной формы.

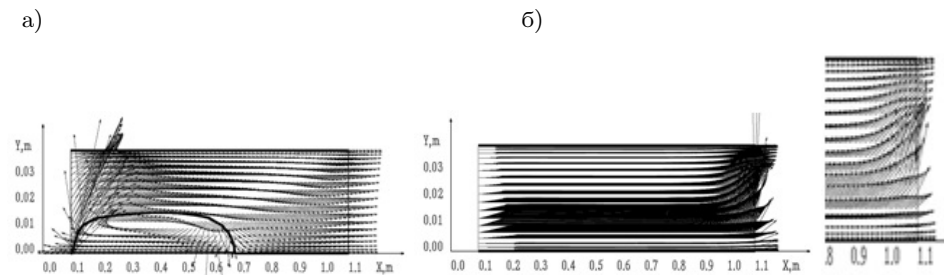


Рис. 9. Поля скоростей: а) $\alpha = 61^\circ$, вид закрутки $\text{tg}(\alpha) = \text{const}$; б) $\alpha = 61^\circ$, вид закрутки — «ломаная линия».

Изменение вида закрутки $\text{tg}(\alpha) = \text{const}$ на вид закрутки «ломаная линия» позволило получить при $\alpha = 61^\circ$ течение без зоны возвратного течения, но не спокойное и имеющее в выходном сечении канала диск тороидальной формы.

Для постоянного во входном сечении угла $\alpha - C_n \text{tg}(\alpha)$, $\alpha = \text{const}$ перестройка течения происходит в диапазоне углов $\alpha = 18^\circ \div 54^\circ$. Устойчивый режим течения начинается при $\alpha = 55^\circ$, когда зона замкнутого возвратного течения («bubble») впервые появляется. В диапазоне углов закрутки $\alpha = 55^\circ \div 85^\circ$ течение с одним «пузырем» сохраняется. Для типа закрутки «ломаная линия» перестройка течения происходит в диапазоне углов $\alpha = 61^\circ \div 70^\circ$. Замкнутая тороидальная зона впервые появляется при $\alpha = 71^\circ$ и сохраняется в диапазоне углов $\alpha = 71^\circ \div 85^\circ$.

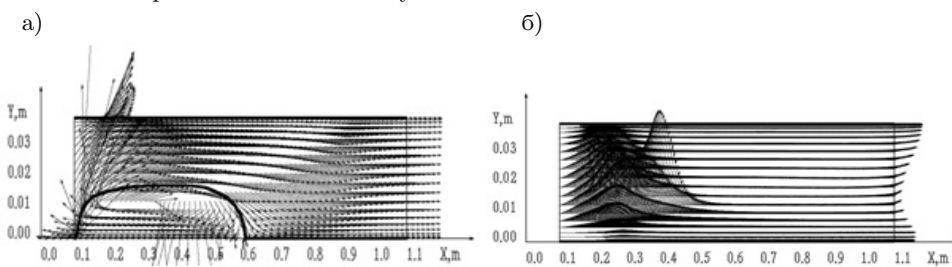


Рис. 10. Поля скоростей: а) $\alpha = 65^\circ$, вид закрутки $\text{tg}(\alpha) = \text{const}$; б) $\alpha = 65^\circ$, вид закрутки — «ломаная линия».

На рис. 10 показаны поля скоростей для углов закрутки $\alpha = 65^\circ$. Для вида закрутки $\text{tg}(\alpha) = \text{const}$ имеет место структура закрученного течения с «пузырем». Для «ломаной линии» — сильно турбулизированное закрученное течение без возвратных зон.

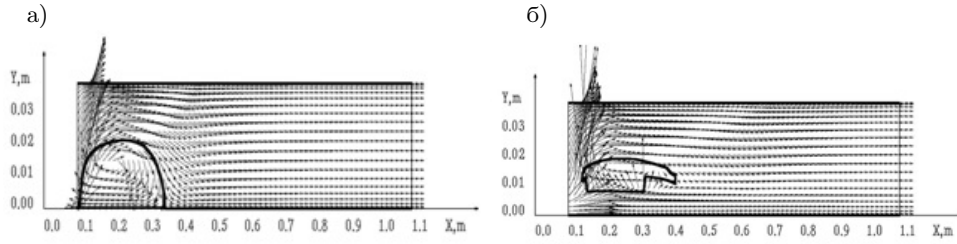


Рис. 11. Поля скоростей: а) $\alpha = 75^\circ$, вид закрутки $\text{tg}(\alpha) = \text{const}$; б) $\alpha = 75^\circ$, вид закрутки — «ломаная линия».

Поля скоростей для углов закрутки $\alpha = 75^\circ, 80^\circ$ и 83° показаны на рисунках 11, 12 и 13. Для вида закрутки $\text{tg}(\alpha) = \text{const}$ имеет место структура закрученного течения с «пузырем». Для «ломаной линии» — закрученное течение с замкнутой возвратной тороидальной зоной. Для углов закрутки $\alpha = 80^\circ$ и 83° также приведены рисунки совмещения границ зон возвратных течений.

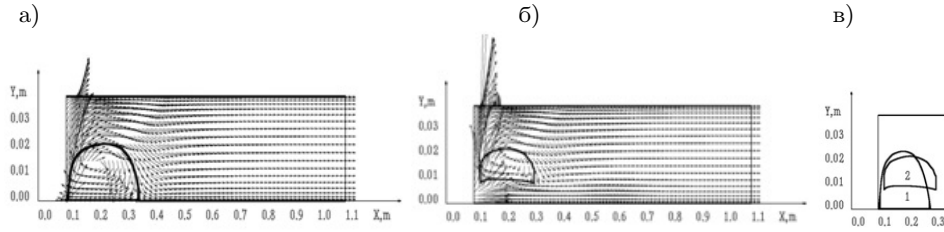


Рис. 12. Поля скоростей: а) $\alpha = 80^\circ$, вид закрутки $\text{tg}(\alpha) = \text{const}$. Зона отрыва в виде «пузыря», б) $\alpha = 80^\circ$, вид закрутки — «ломаная линия» Зона отрыва в виде «тора». в) Рисунок совмещения границ зон отрыва: 1 — $\text{tg}(\alpha) = \text{const}$, 2 — «ломаная линия».

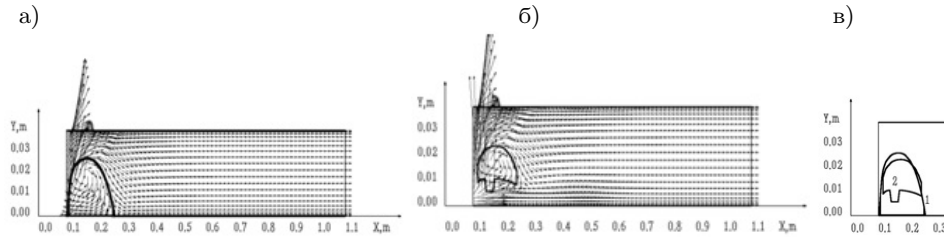


Рис. 13. Поля скоростей: а) $\alpha = 83^\circ$, вид закрутки $\text{tg}(\alpha) = \text{const}$. Зона отрыва в виде «пузыря», б) $\alpha = 83^\circ$, вид закрутки — «ломаная линия» Зона отрыва в виде «тора». в) Рисунок совмещения границ зон отрыва: 1 — $\text{tg}(\alpha) = \text{const}$, 2 — «ломаная линия».

Сравнение результатов расчетов распада вихря в длинной трубе при задании на входе двух видов закрутки показало, что изменение вида закрутки $\text{tg}(\alpha) = \text{const}$ на вид закрутки $\text{tg}(\alpha) = \text{кусочно-линейная функция}$ приводит к изменению структуры распада вихря в трубе. А именно, существенно увеличивается диапазон углов закрутки, при которых наблюдается закрученное ламинарное течение без отрывных зон. Зоны отрыва меняют свою форму «пузыря» на «тороидальную форму».

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. — ЖВМ и МФ, 1961, т. 1, № 3, с. 1020–1050. // *Godunov S. K., Zabrodin A. V., Prokopov G. P.* The differential scheme for two-dimensional unsteady gas dynamic problems and a flow with departed air-blast calculation. — *Computational mathematics and Mathematical physics Journal*, Moscow, 1961, v. 1, № 3, p. 1020–1050.
2. Дорфман Л. А. Численные методы в газодинамике турбомашин. Л.: Энергия, 1974. // *Dorfman L. A.* The numerical methods in gas dynamics' turbo machines. Leningrad, Energy, 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. // *Vysotina V. G.* The inviscid gas flow modeling in the axisymmetrical channels with stream's turns on 180 and 540 degrees. — *The mathematical modeling Journal*, Moscow, 1996, v. 8, № 10, p. 25–34.
4. *Shigeo Uchida, Yoshiaki Nakamura, Masataka Oshawa.* 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. О моделировании осесимметричного распада вихря в трубе методом Годунова. — Обзорение прикл. и промышл. матем., 2014, т. 21, в. 1, с. 47–49. // *Vysotina V. G.* Modeling of an axisymmetric vortex breakdown inside a pipe using Godunov's method. — *OP&PM Surv. Appl. Ind. Math.*, Moscow, 2014, v. 21, is. 1, p. 47–49. (In Russian.)
6. 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. // *Vysotina V. G.* The local air parameters' variation of a vortex breakdown in a pipe. — *OP&PM Surv. Appl. Ind. Math.*, Moscow, 2015, v. 22, is. 4, p. 450–454. (In Russian.)
7. 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. // *Vysotina V. G.* The numerical investigation of the pressure ratio's influence was made on an axisymmetric vortex breakdown in a pipe. — *OP&PM Surv. Appl. Ind. Math.*, 2012, v. 19, is. 2, p. 242–244. (In Russian.)
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. 103–104. // *Vysotina V. G.* The numerical investigation of structures of vortex breakdown in the long pipe. — *International scientific conference on mechanics "The eighth Polyakhov's reading"*, January 30–February 2, 2018, Saint Petersburg, Russia, Book of abstracts, p. 103–104.

UDC 533

Vysotina V. G. (Moscow, OP&PM, Research and Development Department). **A transformation of the vortex breakdown's structure using the change of the type of swirling in the entrance of the long pipe**

Abstract: The two types of swirling flows as a vortex motion with a swirling angle $\alpha = \text{const}$ and motion like zigzag were set on at entrance in the long pipe. The swirl angles were changed from 10° to 87° . For all solutions were retained similar conditions. Godunov's method was used for this investigation. The comparison was made for these two solutions which were obtained for two types of swirling flows. There were two different structures of the "vortex breakdown". One of them, a vortex motion with a swirling angle $\alpha = \text{const}$, have had a bubble form of the separation zone. The other one, a vortex motion like zigzag, have had a toroidal form of the separation zone. The more stable swirling flow was received when a motion like zigzag was set on at the entrance.

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