

УДК 532.527

© 1993 г. А. Б. ВАТАЖИН, В. А. ЛИХТЕР, В. И. ШУЛЬГИН,
С. В. ШУЛЬГИН

НЕОБЫЧНЫЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ ВО ВРАЩАЮЩЕМСЯ КАНАЛЕ

Путем визуализации течения в меридиональной плоскости круглой вращающейся трубы обнаружены два интересных пространственных гидродинамических эффекта. Первый из них — нестационарный процесс после резкой остановки трубы, включающий в себя появление на ее внутренней поверхности периодически расположенных локализованных неоднородностей и их неодинаковый рост в осевом и радиальном направлениях, приводящий к возникновению грибовидных структур. Этот процесс качественно объясняется с помощью теории нестационарных вихрей Гертлера [1].

Второй эффект — установление необычной протяженной устойчивой периодической структуры после того, как первоначально открытый с одной стороны вращающийся канал закрывается неподвижной пластиной с оставлением небольшой щели между пластиной и торцом трубы для протока воздуха из внешнего пространства внутрь трубы. Эта периодическая структура состоит из чередующихся объемов с замкнутым циркуляционным течением и «открытых» объемов, гидродинамически сообщаемых между собой и концом трубы через пристеночные области течения. Предложены простейшие соотношения для некоторых характеристик обнаруженной периодической структуры.

1. Экспериментальная установка. В экспериментах использовалась цилиндрическая труба из оргстекла с внутренним диаметром $2R = 7,8$ см и полной длиной $L = 1,0$ м; один конец трубы был всегда заглушен и торцевая поверхность вращалась вместе с трубой. Другой конец трубы был либо полностью открыт, либо перекрывался неподвижной прозрачной поверхностью. Труба вращалась электродвигателем, частота вращения изменялась вплоть до $\Omega = 8\pi$ с⁻¹ (240 об/мин). Для предотвращения биений трубы использовались специальные продольные и поперечные металлические стяжки.

Визуализация течения производилась путем наполнения трубы дымом (вводимым с открытого конца) и фиксирования картины гидродинамического течения в плоскости мощного лазерного ножа, совпадающей с меридиональной плоскостью трубы.

При полностью открытом конце трубы в области течения выделяются три участка: входной — с втеканием газа в трубу вблизи ее оси и вытеканием газа вблизи стенок; центральный — с медленным распространением возмущений к закрытой торцевой поверхности; концевой — в котором происходит взаимодействие возмущений с вращающейся торцевой стенкой.

Ниже описываются новые эффекты: переходные процессы при резкой остановке трубы с открытым концом и процесс образования специфических стационарных структур при перекрытии открытого конца вращающейся трубы неподвижной поверхностью.

2. Переходные процессы. При длительном вращении трубы с открытым концом заполняющий ее дым вследствие действия центробежных сил сосредоточивается в узкой пристеночной области, поэтому практически весь объем трубы свободен от рассеивающих свет частиц и в плоскости лазерного ножа представляет собой темную область. После резкой остановки трубы (вручную или путем



Фиг. 1

отключения электродвигателя) в потоке развивается своеобразный нестационарный процесс, картина которого (для фиксированного момента времени) показана на фиг. 1. Светлые структуры представляют собой зоны сосредоточения частиц дыма, увлекаемых из пристеночной области развивающимся гидродинамическим течением. Заметим, что характерное время увлечения частицы дыма газодинамическим потоком $t_1 = (2/9)a^2 \rho_s / \mu$ (где $a \sim 0,1$ мкм — радиус частицы, $\rho_s \sim 2$ г/см³, $\mu = 2 \cdot 10^{-4}$ г/см·с — коэффициент динамической вязкости воздуха) составляет $2 \cdot 10^{-7}$ с и при времени переходного процесса $t_2 \sim 5$ с частицы дыма можно считать полностью замороженными в поток. Поэтому развитие светлых структур в данном случае совпадает с развитием газодинамического процесса.

В экспериментах проводилась также скоростная киносъемка картины течения со скоростью 100 кадров/с. Она позволила выделить следующие этапы нестационарного процесса: образование тонкой волнистой поверхности у стенок канала, выделение из этой поверхности периодически расположенных локальных очагов роста возмущений и их развитие в грибовидные структуры, показанные на фиг. 1. Характерные продольный и поперечный размеры отдельного грибовидного элемента (которые сами изменяются со временем) будем обозначать посредством l и δ . Спустя некоторое время эти элементы смыкаются друг с другом и периодическая структура исчезает.

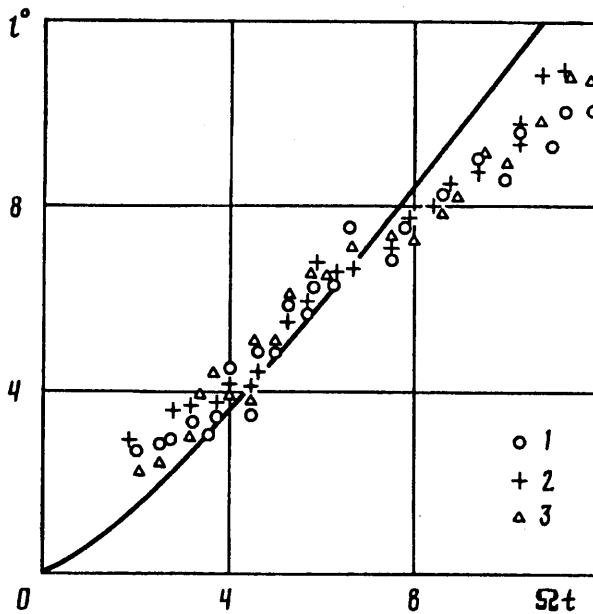
Размеры грибовидных элементов $l(t)$ и $\delta(t)$ в проведенных экспериментах зависят от определяющих параметров: R , Ω , ν , t (ν — коэффициент кинематической вязкости). Согласно теории подобия и размерности [2], величины l/R и δ/R должны зависеть от безразмерного параметра Ωt и числа Рейнольдса $Re = \Omega R^2 / \nu$.

Детализация указанных функциональных зависимостей может быть произведена на основе нелинейной теории вихрей Гертлера [3]. Согласно этой работе, нелинейные структуры, развивающиеся в пограничном слое на вогнутой поверхности в направлении, перпендикулярном основному потоку, характеризуются размерами l и δ , связанными между собой соотношением

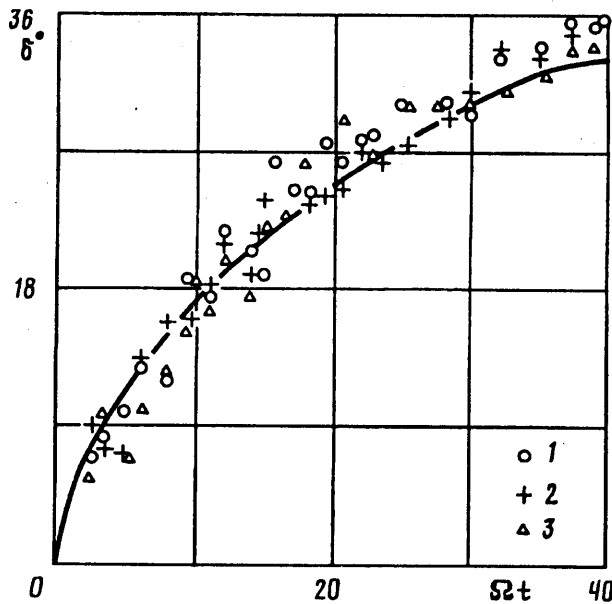
$$l \sim \frac{u}{\nu} (\delta/R)^2 \quad (2.1)$$

где u — скорость основного потока, δ — толщина пограничного слоя, R — радиус кривизны вогнутой поверхности.

В условиях описываемых экспериментов «основным» потоком является первоначальное течение газа в азимутальном направлении. На центральном участке трубы, где вращение газа (до остановки трубы) происходит по закону твердого тела, распределение u по радиусу описывается зависимостью $u = \Omega r$. Пограничный слой на стенках трубы возникает при ее резкой остановке вследствие «включения» граничного условия $u = 0$ при $r = R$. Можно показать, что время развития этого пограничного слоя и время развития нелинейной гертлеровской структуры ока-



Фиг. 2



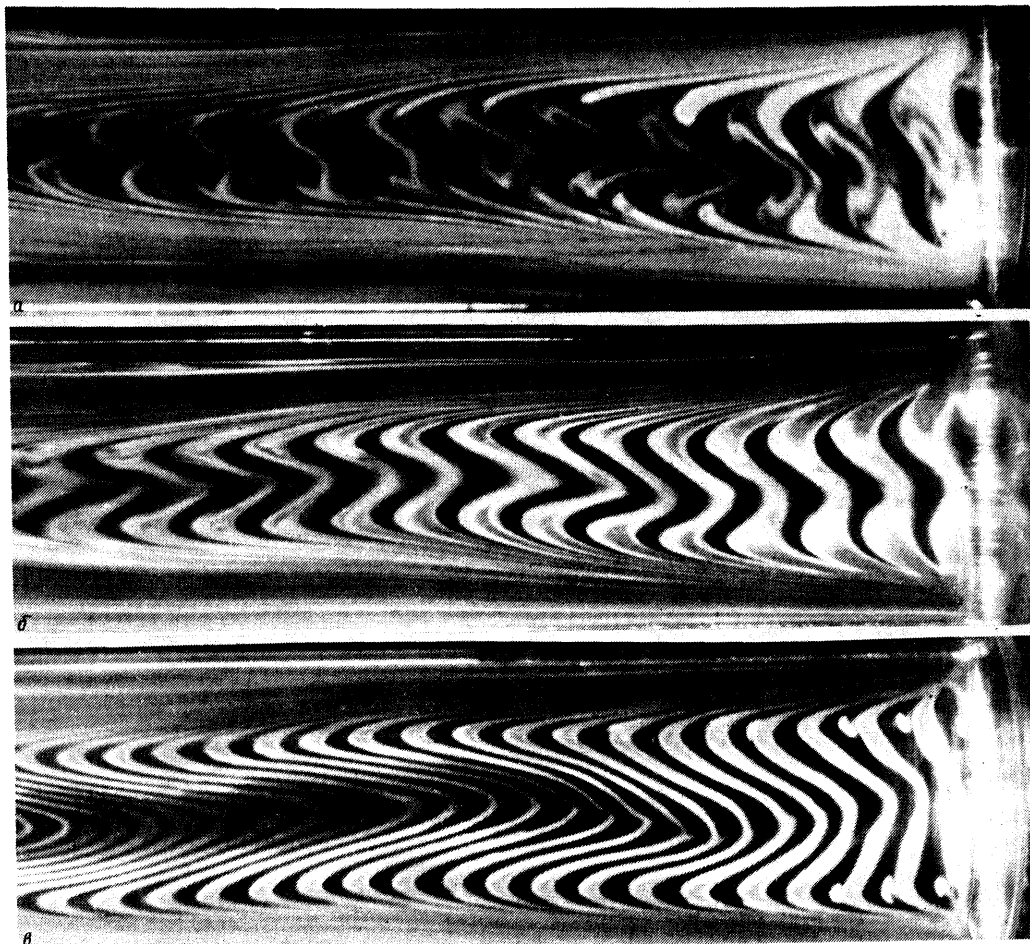
Фиг. 3

зываются одного порядка. Развитие нестационарного пограничного слоя в первом приближении происходит по закону: $\delta^2 \sim \nu t$ [4]. Подставляя это выражение в (2.1) и принимая $u \sim \Omega R$, находим

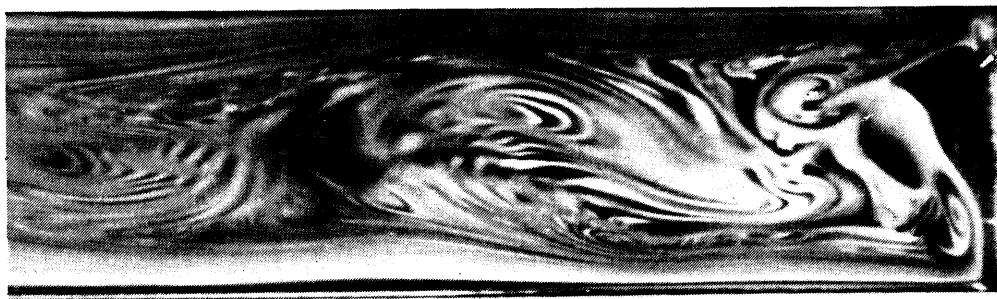
$$l^\circ = \frac{l Re^{1/4}}{R} \sim (\Omega t)^{3/4}, \quad \delta^\circ = \frac{\delta Re^{1/2}}{R} \sim (\Omega t)^{1/2} \quad (2.2)$$

Второе соотношение в (2.2) представляет собой преобразованное выражение $\delta^2 \sim \nu t$.

Обработка данных скоростной киносъемки (по размерам l и δ) в соответствии с (2.2) производилась в переменных $(l^\circ, \Omega t)$ и $(\delta^\circ, \Omega t)$. При каждом из трех



Фиг. 4



Фиг. 5

значений $\Omega = 12,5; 20; 25 \text{ с}^{-1}$ обрабатывалось около 30 кадров, соответствующих различным стадиям нестационарного процесса. Результаты представлены на фиг. 2 и 3; точки 1—3 соответствуют указанным выше значениям Ω . Сплошными линиями на этих фигурах показаны зависимости (2.2), в которых коэффициенты пропорциональности определены по всему массиву экспериментальных точек. Из представленных данных следует, что проведенный качественный анализ удовлетвори-

тельно описывает рассматриваемый нестационарный процесс, причем теоретическая аппроксимация по поперечному размеру δ оказывается адекватной эксперименту в значительно большем диапазоне значений параметра Ωt .

Нестационарные гертлеровские структуры наблюдаются не только на центральном участке трубы, где реализуются наиболее чистые условия эксперимента, но и на входном участке, где до остановки трубы имеет место сложное газодинамическое течение. Это свидетельствует о том, что вид профиля азимутальной скорости при вращении трубы перед ее остановкой не является определяющим — основную роль играет эффект развития нестационарного пограничного слоя на вогнутой поверхности трубы после ее остановки.

Полное теоретическое исследование нестационарных гертлеровских структур, имеющих место в проведенных экспериментах, является весьма сложной задачей, которая еще ожидает своего решения.

3. Стационарные периодические структуры. Целью описываемых ниже экспериментов являлось изучение эффектов, возникающих при изменении граничных условий во входном сечении вращающейся трубы. Для этого, как указывалось выше, труба после заполнения ее дымом с открытого конца перекрывалась неподвижной прозрачной пластиной так, чтобы оставалась небольшая щель между пластиной и торцом трубы для обеспечения протока воздуха из внешнего пространства внутрь трубы. При этом разрушается первоначальное газодинамическое течение на входном участке (описанное в разд. 1) и начинается постепенное медленное формирование необычной пространственной структуры, окончательный вид которой показан на фиг. 4 для трех значений $\Omega = 4; 6$ и 12 с^{-1} . Эта структура состоит из чередующихся светлых участков, в которых в течение длительного времени сохраняется дым без какого бы то ни было его «вымывания», и темных участков, в которых частицы дыма отсутствуют.

Процесс формирования таких структур состоит в появлении вблизи неподвижной пластины (на фиг. 4 — справа) из первоначального «хаоса» одной оптической «страты», затем другой и т. д. с постепенным заполнением ими вращающейся трубы. При этом появление новых не изменяет формы и положения ранее сформировавшихся страт. Сложная картина газодинамического течения в один из моментов переходного процесса перед появлением первой устойчивой страты показана на фиг. 5. При устранении зазора между неподвижной пластиной и торцом вращающейся трубы установившаяся регулярная периодическая структура постепенно разрушается, начиная от торца трубы, и в конце концов исчезает по всей длине канала.

Перейдем теперь к анализу стационарных структур, показанных на фиг. 4. Каждая светлая страта, в которой очень долго сохраняются частицы дыма, представляет собой совокупность замкнутых зон газодинамического течения. Темные же страты должны представлять собой «открытые» зоны газодинамического течения (так как частицы дыма «вымываются» из этих областей поступающим через щель наружным воздухом).

Подтверждением описанной качественной картины служит следующий специальный эксперимент. После формирования устойчивой периодической структуры в зазор между неподвижной пластиной и вращающейся трубой подавалась небольшая порция дыма, «движение» которой в меридиональной плоскости происходит по линиям тока в этой плоскости. Дымовой «маркер» последовательно движется по темным областям, постепенно продвигаясь внутрь трубы, и не попадает в светлые области.

Из количественных закономерностей для полученных периодических структур отметим следующие. Число n страт на участке заданной длины и скорость v распространения вглубь канала «фронта» стратификации подчиняются соотношениям $n^2/\Omega = \text{const}$ и $v^2/\Omega = \text{const}$. В частности, при $\Omega = 6 \text{ с}^{-1}$ (60 об/мин) значение скорости распространения «фронта» стратификации составляет $v = 1,2 \text{ см/с}$, а число страт составляет около 6 на 10 см длины канала.

Однако детальный качественный анализ обнаруженных структур, не говоря уже об их математическом описании, является чрезвычайно трудной проблемой.

Весьма возможно, что описанная выше устойчивая стратификация течения связана со специфическими эффектами во вращающихся системах: эффектом Прудмана — Тейлора [5] и образованием волн Россби [6].

В заключение авторы выражают благодарность Ю. Г. Гуревичу за помощь и плодотворное обсуждение результатов, полученных в разд. 2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Görtler H.* Über eine dreidimensionale Instabilität laminarer Grenzschichten an Konkaven Wänden//ZAMM. 1941. В. 21. № 4. S. 250—252.
2. *Седов Л. И.* Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1987. 430 с.
3. *Гуревич Ю. Г.* Развитие локального возмущения в пограничном слое на искривленной поверхности//Изв. АН СССР. МЖГ. 1990. № 1. С. 23—31.
4. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1969. 742 с.
5. *Taylor G. I.* Experiments with Rotating Fluids.//Proc. Roy. Soc. London, Ser. A, v. 100, 1921, p. 114.
6. *Lugt H. J.* Vortex Flow in Nature and Technology. John Wiley & Sons, N. Y., 1983.

Москва

Поступила в редакцию
15.VI.1992