

11. Thyson N., Neuringer J., Pallone A., Chen K. K. Nose tip shape change predictions during atmospheric reentry.— N. Y., 1970.— (Pap./AIAA; N 70—827).
12. Michel R., Cousteix J., Quemard C. Application d'un schéma amélioré de longueur de mélange à l'étude de couches limites turbulentes tridimensionnelles // AGARD Meeting on Turbulent Shear Flows.— London, 1971.
13. Vettlitsky V. N., Krause E. Berechnung dreidimensionaler Grenzschichten an spitzen Körpern // Abhandl. Aerodyn. Inst. der RWTH Aachen.— Aachen, 1990.— Н. 30.
14. Cebeci T., Smith A. M. O. Analysis of turbulent boundary layers.— N. Y.: Academic Press, 1974.
15. Pletcher R. H. On a finite difference solution for the constant property turbulent boundary layer // AIAA J.— 1969.— N 7.
16. Vettlitsky V. N. Laminar boundary layer on a flat plate with rotating cylinder // Computers and Fluids.— 1981.— N 9.
17. Ветлуцкий В. Н., Поплавская Т. В. Численный расчет трехмерного ламинарного сжимаемого пограничного слоя на профилированных треугольных крыльях со сверхзвуковыми передними кромками // ПМТФ.— 1993.— № 5.
18. Ветлуцкий В. Н., Поплавская Т. В. Сжимаемый ламинарный пограничный слой на плоской треугольной пластине с присоединенной ударной волной // ПМТФ.— 1985.— № 5.

г. Новосибирск

Поступила 18/II 1993 г.

УДК 532. 516:532. 526

А. Б. Езерский, М. Гариб, М. Хаммаши

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ СТРУКТУРА СЛЕДА ЗА НАГРЕТЫМ ЦИЛИНДРОМ

Теплопередача, возникающая при обтекании потоком нагретых тел, может существенно влиять на гидродинамические течения. При малых скоростях потока (характерная скорость много меньше скорости звука) такое влияние прежде всего обусловлено зависимостью вязкости жидкости от температуры. Локальное изменение вязкости, а следовательно, и сдвиговых напряжений приводит к изменению профилей средней скорости. Это, в свою очередь, влияет на устойчивость гидродинамических течений и пространственно-временные характеристики собственных мод.

Подобные процессы изучались как для пограничного слоя [1, 2], так и для следа за нагретым цилиндром [3, 4]. К настоящему времени наиболее подробно исследовано влияние теплопередачи на временные характеристики следа при числах Рейнольдса $Re \leq 10^2$. В данной работе изучается влияние теплопередачи на пространственную структуру вихревой дорожки.

Качественное объяснение такого воздействия теплообмена достаточно простое. С ростом температуры T кинематическая вязкость воздуха $\nu = \nu(T)$ увеличивается: динамическая вязкость $\mu = \mu(t)$ слабо зависит от температуры, а плотность воздуха ρ обратно пропорциональна температуре. Поэтому с увеличением температуры $\nu = \mu/\rho$ возрастает*. Если определить число Рейнольдса как $Re = \frac{Ud}{\nu(T_w)}$ (U — скорость набегающего потока, d — диаметр цилиндра, T_w — температура цилиндра), то оно уменьшается с ростом T . Ясно, что температура увеличивается лишь в пограничном слое и следе. Однако в воздухе число Прандтля $Pr = \frac{\nu}{k}$ (k — температуропровод-

* Отметим, что для воды зависимость обратная — ее кинематическая вязкость уменьшается с ростом температуры: более существенное уменьшение динамической вязкости, чем уменьшение плотности.

ность) близко к единице ($Pr \approx 0,75$), пространственные распределения средней температуры и средней завихренности подобны [5]. Это означает, что там, где есть сдвиг скорости, есть температурное поле, обусловленное теплопередачей. Температура в следе, естественно, меньше, чем температура нагретого цилиндра, тем не менее воздействие локального нагрева может быть существенным, по крайней мере, в случае, если изучаются течения вблизи бифуркационных параметров.

Результат воздействия нагрева цилиндра на параметры вихревой дорожки можно предсказать из следующих физических соображений. Как известно, безразмерная частота срыва — число Струхала $Sh = f \frac{d}{U}$ (f — частота, Гц) — убывает с уменьшением Re . Из-за того что с увеличением температуры эффективно уменьшается число Рейнольдса, частота срыва вихрей уменьшается, а при достаточном нагреве срыв вихрей может прекращаться. Именно эти эффекты и наблюдались в экспериментах [3, 4].

В связи с приведенным выше качественным объяснением зависимости сдвига частоты от температуры обтекаемого цилиндра следует отметить, что в ряде работ предложен другой способ объяснения этого эффекта. Так, в [6] проведен расчет инкремента абсолютной неустойчивости следа неоднородного по температуре, а значит, и по плотности (в центре следа плотность меньше, чем на периферии). Эти результаты были применены для объяснения воздействия нагрева на характеристики следа за цилиндром. Расчет показал, что при достаточно малой плотности воздуха за цилиндром абсолютная неустойчивость исчезает, и этим объясняется подавление вихреобразования при повышении температуры цилиндра. Из расчетов следует, что нагрев цилиндра должен приводить к увеличению частоты вихреобразования, тогда как эксперимент [3, 4] показывает, что нагрев приводит к противоположному эффекту. Авторы [6] подчеркивают, что исчезновение абсолютной неустойчивости происходит и для невязкой модели. Основной эффект связан с изменением плотности воздуха. Объяснение, которое мы привели, основывается на том, что изменение температуры цилиндра влияет на вязкость, что, в свою очередь, обуславливает изменение профиля скорости за обтекаемым цилиндром (влияние нагрева цилиндра на профиль средней скорости было действительно обнаружено в [3]).

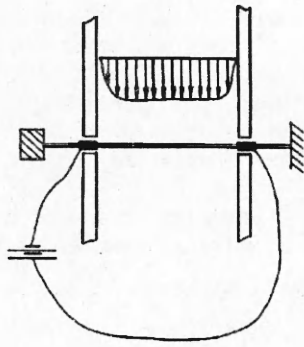
Для количественной характеристики воздействия нагрева в [3, 4] использована эффективная температура. Под ней понимается такое повышение температуры среды $\Delta T_{эфф}$, которое приводит к такому же результату, что и нагрев цилиндра на величину $\Delta T_{ц}$. Эффективная температура может быть определена различными способами: по уменьшению частоты срыва вихрей или по подавлению вихреобразования за цилиндром. Оба эти способа дают приблизительно одинаковую эффективную температуру, однако результаты [3, 4] различаются. Так, в [4] $\Delta T_{эфф} = 0,3 \Delta T_{ц}^*$, а в [3] $\Delta T_{эфф} \approx 0,23 \Delta T_{ц}$. Такое отличие было обусловлено, по-видимому, тем, что в [3] цилиндр располагался вертикально, а в [4] — горизонтально. Это влияло на эффективность конвекции. Согласно оценкам, приведенным в [4], естественной конвекцией у нагретого цилиндра можно пренебречь по сравнению с вынужденной, если

$$(1) \quad Re > (Gr)^{1/3},$$

где $Gr = \frac{gl^3}{\nu^2} \beta \Delta T_{ц}$; g — ускорение свободного падения; l — вертикальный размер; β — температурный коэффициент объемного расширения.

Для экспериментов [4] l — это диаметр цилиндра и условие (1) выполняется. Для экспериментов [3] l — длина цилиндра и вы-

* В [4] определялась эффективная пленочная температура $\Delta T_{эфф,пл} = 0,5 \Delta T_{эфф}$.



Р и с. 1

полняется обратное условие ($Re \leq (Gr)^{1/3}$). Этим, по-видимому, объясняется отличие результатов [3, 4]. Естественная конвекция усиливает теплообмен со средой и вследствие этого уменьшается эффективная температура.

Кроме измерений эффективной температуры и условий подавления вихреобразования в [3] исследовано воздействие нагрева на переход от регулярного срыва вихрей к хаотическому при $Re \sim 160$.

Известно [7], что при $Re \sim 160$ процесс срыва вихрей становится случайным. Как показано в [3], повышение температуры цилиндра

приводит к регуляризации вихревой дорожки — спектр пульсаций становится очень узким.

Подчеркнем, что в цитируемых работах изучались временные характеристики вихревой дорожки, а представление о развитии следа в пространстве можно было получить, используя результаты измерений в различных точках. Более подробно можно исследовать структуру следа, если изучать временные характеристики одновременно с визуализацией течения. Именно так и изучался след за нагретым цилиндром в данной работе.

Эксперимент проводился в аэродинамической трубе Института нелинейных исследований Калифорнийского университета (Сан-Диего, Калифорния). Рабочая часть трубы имела поперечное сечение 61×61 см. Полый стальной цилиндр диаметром $d = 0,08$ см был подвешен на специальной раме так, что не касался стенок трубы: в верхней и нижней стенке рабочей части сделаны отверстия, а вне трубы в нижнем конце цилиндра укреплялся груз весом несколько килограммов (рис. 1). При таком способе крепления исключалось влияние вибрации стенок на срыв вихрей. Нагрев цилиндра проводился источником постоянного тока. По электрической мощности Q , выделяющейся на цилиндре, рассчитывалась его температура, как это делалось в [3]. При этом использовалась эмпирическая зависимость числа Нуссельта Nu от Re [7]:

$$Nu = 0,36 Re^{1/2} + 0,057 Re^{2/3}.$$

Температура цилиндра ΔT_c определялась как

$$\Delta T_c = Q / \pi \lambda_0 Nu (Re),$$

где λ_0 — теплопроводность воздуха при температуре набегающего потока. Для визуализации вихревой дорожки применялась техника дымовой визуализации, развитая в [8, 9]. За обтекаемым цилиндром параллельно его оси натягивалась тонкая проволока, которая смачивалась жидкостью. Чтобы получить дым, проволока нагревалась импульсом электрического тока. Распределение дыма в вихревой дорожке подсвечивалось лампой-вспышкой. При помощи CCD-камеры мгновенный снимок вводился в запоминающее устройство, а затем записывался на видеоманитон. Пульсации скорости измерялись термоанемометром постоянного тока TSI, а временные характеристики сигнала — с помощью анализатора SD380Z.

Как показала визуализация, в отсутствие нагрева при $Re = 61,5$ вихри в дорожке Кармана за цилиндром имели дугообразную форму выпуклостью навстречу потоку: в центральной части вихревые нити параллельны цилиндру, а у стенок трубы наклонены относительно оси обтекаемого цилиндра. Визуализация небольшого участка вихревой дорожки в пристеночной области показана на рис. 2, а.

Как видно, дорожка периодическая по пространству. Временные спектры пульсаций, регистрируемых термоанемометром, удаленным на $60d$ (5 см) от

обтекаемого цилиндра, достаточно узкие, что говорит и о временной периодичности вихревой дорожки.

При нагреве цилиндра относительно набегающего на него потока происходит уменьшение частоты срыва вихрей. Эффективная температура была приблизительно на 30 % меньше, чем для экспериментов, описанных в [3]. Уменьшение эффективной температуры связано, по-видимому, с влиянием естественной конвекции. При тех же разностях температур, что и в [3], число Грасгофа в данном эксперименте в 8 раз больше (в 2 раза отличаются поперечные размеры рабочих частей аэродинамических труб и соответственно длины цилиндров).

Нагрев существенно изменяет пространственную структуру вихревой дорожки. Так, нити становятся волнообразными (рис. 2, б). Визуально картина вихревой дорожки напоминает зигзагообразную неустойчивость роликов в термоконвекции. Мгновенные снимки были различными в разные моменты времени (рис. 2, в). Как видно, амплитуда и длина волны этих зигзагообразных возмущений непостоянны во времени. Характерной деталью такого режима вихревой дорожки за нагретым цилиндром является то, что в любой момент времени среднее положение вихревой нити параллельно обтекаемому цилиндру. Такая структура возникает вместо системы дугообразных вихрей при $\Delta T_{\text{ц}} > 70 \text{ }^\circ\text{C}$.

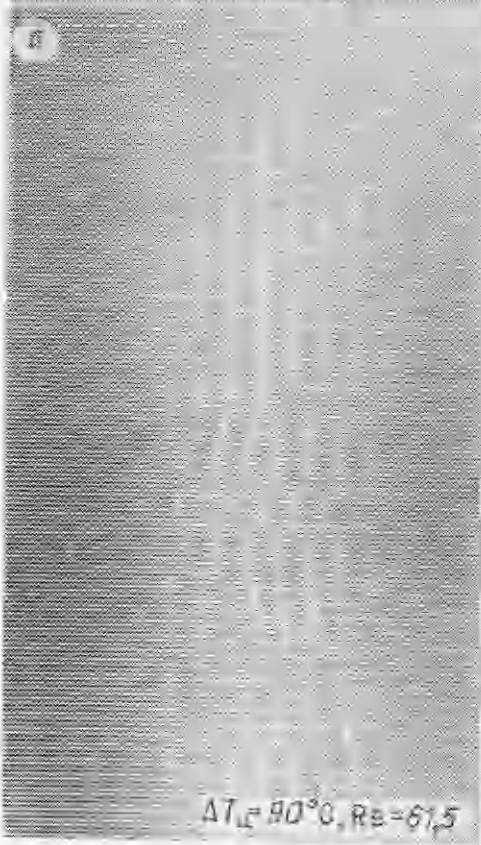
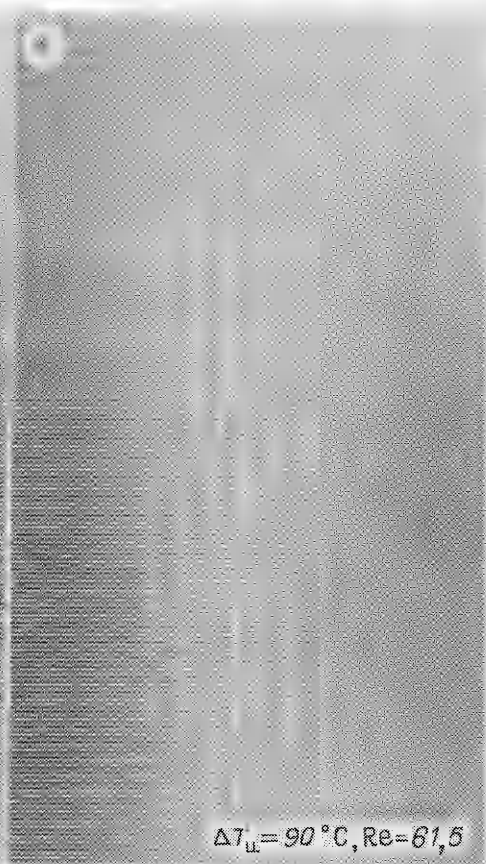
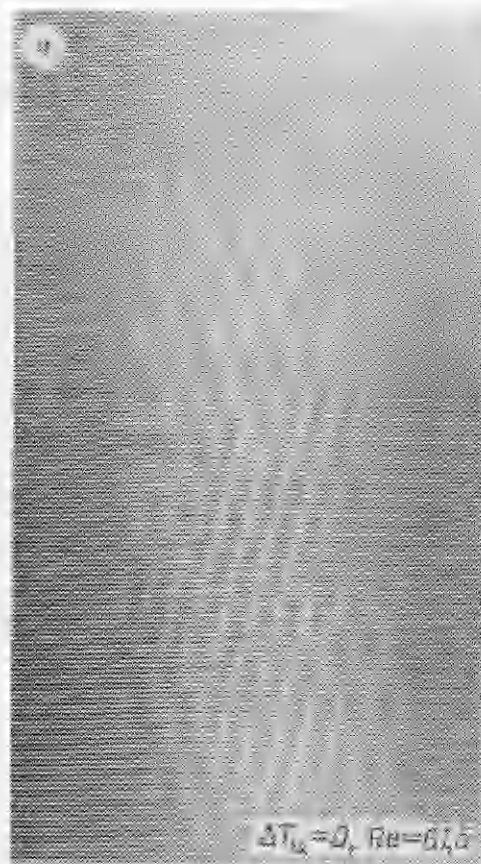
Временной спектр пульсаций $B(f)$, соответствующий вихрям на рис. 2, б, в, показан на рис. 3, б. Увеличение ширины спектра по сравнению со спектром рис. 3, а связано с возбуждением волновых движений в вихревой дорожке.

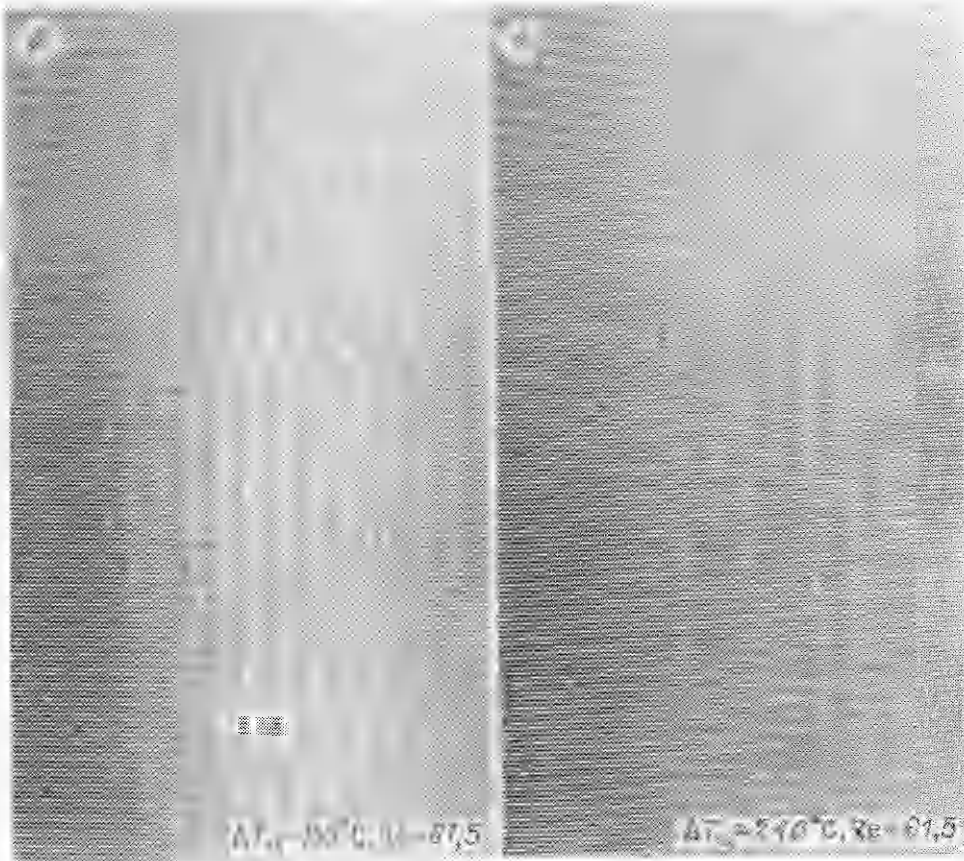
При большей температуре (рис. 2, г, д) наблюдались не только зигзагообразные вихри, но в вихревой дорожке возникали дефекты. Временные спектры пульсаций (рис. 3, в) были при этом достаточно широкими.

Наиболее неожиданным результатом явилось то, что при температуре $\Delta T_{\text{ц}} > 230 \text{ }^\circ\text{C}$ вихри становились строго параллельными обтекаемому цилиндру (рис. 2, е), а ширина спектра пульсаций резко уменьшалась (рис. 3, г). В определенном смысле нагрев цилиндра приводил к ламинаризации вихревой дорожки. Отметим, что при измерениях временных характеристик следа за нагретым цилиндром термоанемометр регистрирует «смесь» температурных пульсаций и пульсаций скорости. Поэтому использование термоанемометра для таких измерений нуждается в обосновании. Есть два обстоятельства, благодаря которым такое обоснование возможно. Во-первых, эксперимент проводился при скоростях, много меньших скорости звука, и в этом случае в среде нет распространяющейся дополнительной энтропийной моды. Во-вторых, как уже отмечалось, $Pr \approx 1$ для воздуха и подобны не только средние профили температуры и завихренности, но и пульсации этих величин. Поэтому, даже не разделяя вихревые и температурные поля, можно получить качественно верные выводы об эволюции спектров гидродинамических пульсаций с ростом температуры цилиндра.

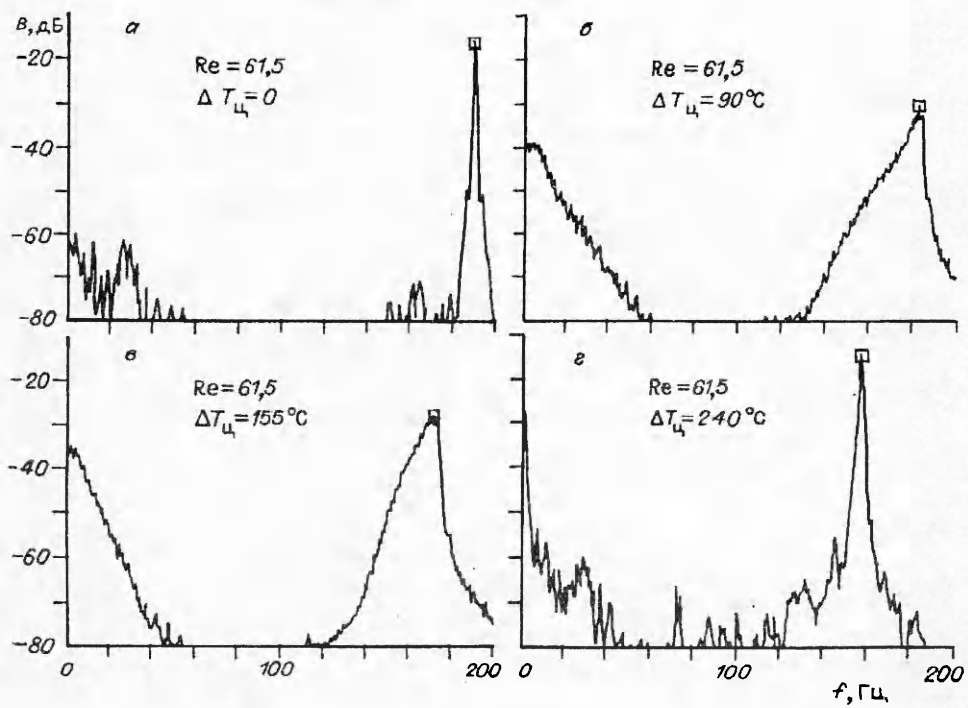
При $Re \sim 160$ вихревая дорожка становится неустойчивой. Спектр пульсаций при этом сплошной (рис. 4, а), а след за цилиндром представляет пространственно неупорядоченные вихри (рис. 5, а). Нагрев цилиндра приводит к регуляризации вихрей в вихревой дорожке, которая становится периодической по пространству (рис. 5, б, $\Delta T_{\text{ц}} = 280 \text{ }^\circ\text{C}$). Временной спектр пульсаций в следе очень узкий (рис. 4, б).

Такое изменение структуры вихревой дорожки не объясняется уменьшением Re . Если уменьшить скорость потока так, чтобы частота срыва вихрей была приблизительно равна частоте срыва вихрей с нагретого цилиндра, то пространственно-временная структура будет совершенно иной. Во временном спектре (рис. 4, в) можно выделить характерную частоту модуляции, а на мгновенном снимке — характерный масштаб поперечной модуляции. Сравнение режимов, представленных на рис. 4, 5, говорит о том, что вихри, срывающиеся с нагретого цилиндра, и вся вихревая дорожка в целом более устойчивы, чем в отсутствие нагрева.

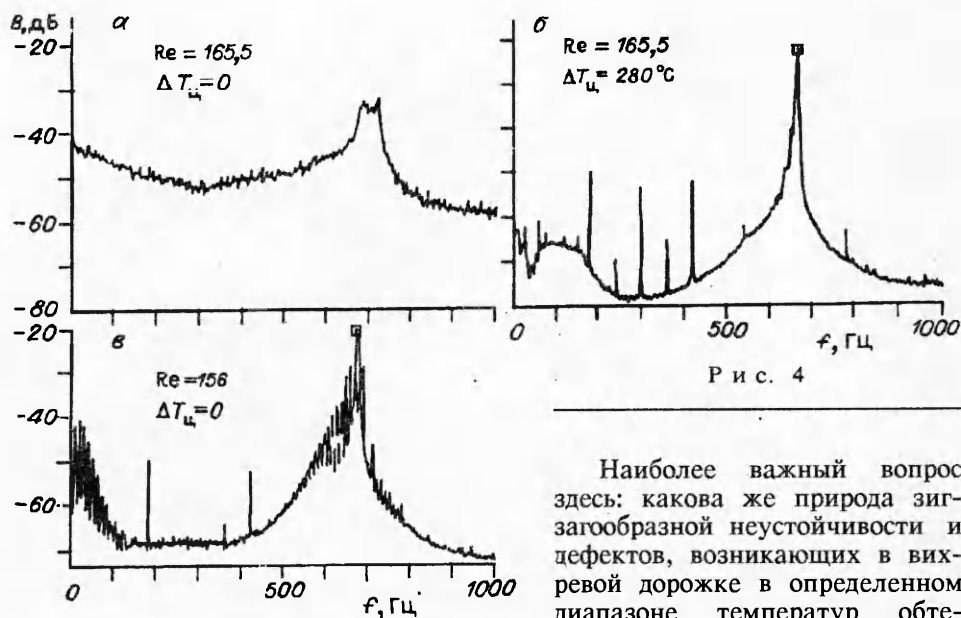




Р и с. 2



Р и с. 3



Р и с. 4

Наиболее важный вопрос здесь: какова же природа зигзагообразной неустойчивости и дефектов, возникающих в вихревой дорожке в определенном диапазоне температур обтекаемого цилиндра? Возможны

в принципе две причины, порождающие такие структуры.

1. Неустойчивость вихрей с нагретым ядром. Такая неустойчивость должна бы отсутствовать, если жидкость однородна по температуре.

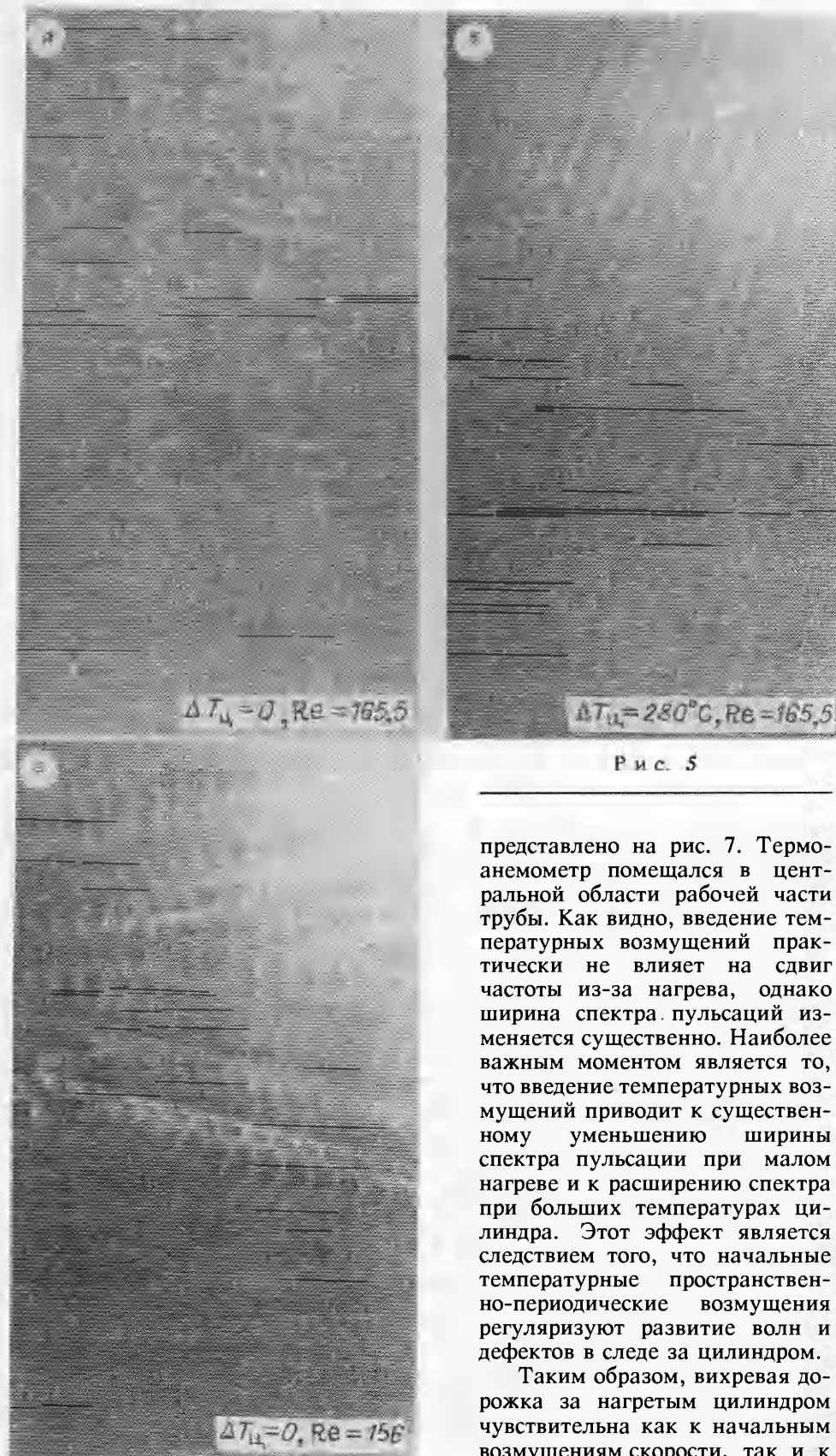
2. Конвекционная неустойчивость в окрестности нагретого цилиндра, расположенного вертикально. Из-за этой неустойчивости могли бы возникнуть начальные возмущения, которые потом трансформируются в зигзагообразные вихри или дефекты. Дорожка дает лишь пространственную развертку возмущений, продуцируемых у нагретого цилиндра.

Чтобы определить, какая из возможностей реализуется в эксперименте, были проведены детальные измерения сдвига частоты и ширины спектра пульсаций при различных условиях образования дорожки и различных положениях термоанемометра.

Результаты, полученные при помещении термоанемометра на расстоянии 3,5 см от цилиндра в центральной области рабочей части трубы (сплошные линии) и у стенки (штриховые), показаны на рис. 6. Видно, что сдвиг частоты F одинаков лишь при малых температурах. С ростом температуры отличаются как сдвиг частоты, так и ширина спектра пульсаций S . Интервалу $70^\circ\text{C} < \Delta T_{\text{ц}} < 230^\circ\text{C}$, где спектр пульсаций широкий (рис. 6), соответствует дорожка, состоящая из зигзагообразных вихрей или из вихрей с дефектами. Сравнение ширины спектров, представленных на рис. 6, показывает, что вблизи стенки спектр пульсаций становится широким при меньших температурах. Это указывает на то, что пристеночная турбулентность (пульсации скорости) может трансформироваться в пространственные нерегулярности вихревой дорожки.

Кроме изучения восприимчивости дорожки к возмущениям скорости изучалось и воздействие пульсаций температуры. Для введения возмущений в вихревую дорожку за цилиндром использовался следующий прием. На поверхность цилиндра наносился тонкий слой краски. Этот слой не влиял на динамику вихрей, однако ввиду того что теплопроводность краски значительно меньше теплопроводности стали, условия теплообмена на окрашенных и неокрашенных поверхностях цилиндра были разными. Благодаря этому возможно введение температурных возмущений в вихревую дорожку. Покраска цилиндра была произведена периодически с периодом ~ 7 см, что близко к периоду зигзагообразных возмущений на вихрях.

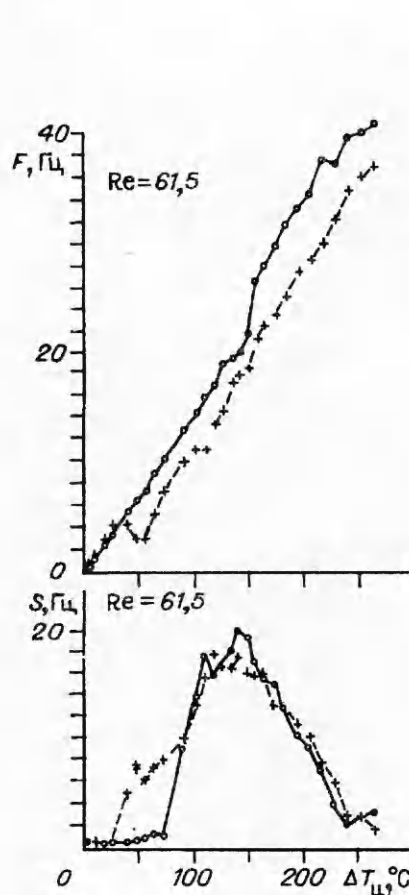
Сравнение сдвига частоты F и ширины спектра пульсаций S для окрашенного (штриховые линии) и неокрашенного (сплошные) цилиндров



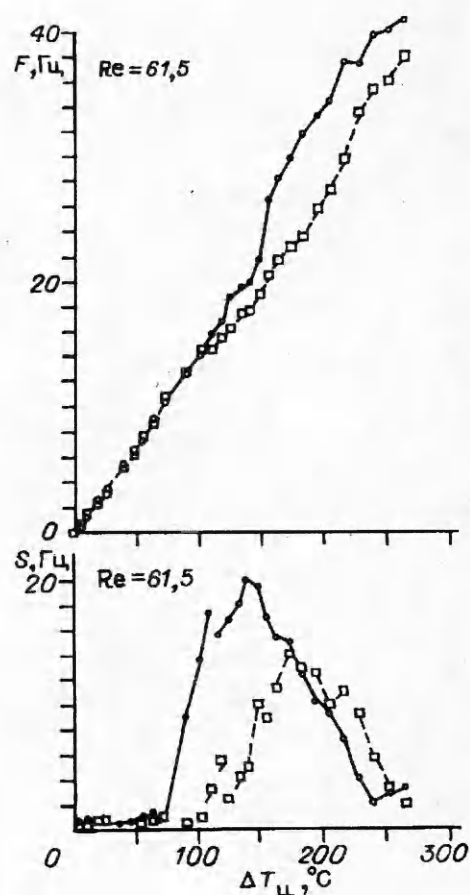
Р и с. 5

представлено на рис. 7. Термоанемометр помещался в центральной области рабочей части трубы. Как видно, введение температурных возмущений практически не влияет на сдвиг частоты из-за нагрева, однако ширина спектра пульсаций изменяется существенно. Наиболее важным моментом является то, что введение температурных возмущений приводит к существенному уменьшению ширины спектра пульсации при малом нагреве и к расширению спектра при больших температурах цилиндра. Этот эффект является следствием того, что начальные температурные пространственно-периодические возмущения регуляризуют развитие волн и дефектов в следе за цилиндром.

Таким образом, вихревая дорожка за нагретым цилиндром чувствительна как к начальным возмущениям скорости, так и к



Р и с. 6



Р и с. 7

возмущениям температуры. Что особенно важно, зигзагообразные вихри и дефекты существуют в определенном диапазоне температур нагретого цилиндра. При малых и больших температурах такие структуры отсутствуют. Это говорит о том, что реализуется первый из указанных выше механизмов — неустойчивость вихрей с высокой температурой ядра. Если бы реализовался второй механизм — конвекционная неустойчивость в окрестности вертикального цилиндра, то с ростом его температуры (Gr — параметр неравновесности — увеличивается) происходило бы увеличение амплитуды волн и количества дефектов в вихревой дорожке. Это привело бы к увеличению ширины спектра пульсаций. В эксперименте наблюдаются противоположные эффекты. При большой температуре обтекаемого цилиндра вихревая дорожка становится регулярнее.

В связи с тем что при малой температуре цилиндра течение менее устойчиво, а при большой температуре более устойчиво, чем в однородной по температуре среде, можно провести аналогию с течением стратифицированной жидкости в канале. Очевидно, что введение стратификации влияет на устойчивость течения. Для сдвигового течения, в котором точка перегиба совпадает с минимумом завихренности, введение небольшой стратификации приводит к дестабилизации течения [10, 11]. Если же стратификация достаточно сильная, то для такого класса течений она приводит к стабилизации потока (согласно критерию Майлса течение со стратификацией устойчиво, если число Ричардсона больше 0,25). Аналогичный эффект наблюдается и здесь: при малой температуре, а следовательно, и малой разности плотностей происходит возбуждение зигзагообразных волн на фоне вихревой дорожки, а при больших — стабилизация течения.

В заключение отметим, что предложенный механизм неустойчивости и стабилизации вихревой дорожки за нагретым цилиндром и обсуждаемые в связи с этим аналогии можно рассматривать сейчас как гипотезы. Чтобы подтвердить или опровергнуть их, необходимы, на наш взгляд, не только дополнительные эксперименты, но и теоретический расчет устойчивости вихрей с нагретым ядром.

Авторы признательны проф. Г. Абарбанелю (ИНИ, Калифорнийский университет, Сан-Диего) и проф. М. И. Рабиновичу (ИПФ РАН, Нижний Новгород) за интерес к работе и многочисленные дискуссии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Качанов Ю. С., Козлов В. В., Левченко В. Я. Экспериментальное исследование влияния охлаждения на устойчивость ламинарного пограничного слоя // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук.— 1974.— Вып. 2.— С. 75—79.
2. Strazisar A. J., Reshotko E., Prah J. M. Experimental study of the stability of heated laminar boundary layers in water // J. Fluid Mech.— 1972.— V. 83, pt 2.— P. 225—247.
3. Езерский А. Б. Отрывное обтекание нагретого цилиндра при малых числах Маха // ПМТФ.— 1990.— № 5.— С. 56—62.
4. Lecorder J. C., Hamma L., Paranthoen P. The control of vortex shedding behind heated circular cylinders at low Reynolds numbers // Experiments in Fluids.— 1991.— N 10.— P. 224—229.
5. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя.— М.: Наука, 1974.
6. Ming-Huei Yu, P. Monkewitz. The effect of nonuniform density on the absolute instability of two-dimensional inertial jets and wakes // Phys. Fluids A.— 1990.— V. 2, N 7.— P. 1175—1181.
7. Чжен П. Отрывные течения.— М.: Мир, 1973.— Т. 1—3.
8. Hammache M., Gharib M. A novel method to promote parallel vortex shedding in the wake of circular cylinder // Phys. Fluids A.— 1989.— V. 1, N 10.— P. 1611—1614.
9. Hammache M., Gharib M. An experimental study of parallel and oblique vortex shedding from circular cylinder.—S. 1., 1991.— (Prepr./VCSD).
10. Thorp A. S. Neutral eigensolutions of the stability equation for stratified shear flow // J. Fluid Mech.— 1969.— V. 36, pt 4.— P. 673—683.
11. Маков Ю. Н., Степанянц Ю. А. О влиянии стратификации на устойчивость сдвиговых течений идеальной жидкости // ДАН СССР.— 1985.— Т. 284, № 5.— С. 1084—1088.

г. Нижний Новгород

*Поступила 7/IX 1992 г.,
в окончательном варианте — 29/III 1993 г.*

УДК 532.5

В. А. Владимиров, К. И. Ильин

УСТОЙЧИВОСТЬ ТВЕРДОГО ТЕЛА В ВИХРЕВОМ ПОТОКЕ ИДЕАЛЬНОЙ ЖИДКОСТИ

Задача о движении твердого тела в идеальной жидкости — классический раздел гидродинамики [1, 2]. Устойчивость стационарных движений тела в потенциальных потоках изучалась ранее в [1—5]. В настоящей работе рассматривается двумерная задача устойчивости твердого тела в стационарном вихревом потоке идеальной несжимаемой жидкости. Построен сохраняющийся функционал, имеющий критическую точку на решении стационарной задачи обтекания тела. Методом Арнольда [6] получены достаточные условия устойчивости по линейному приближению. Общий результат применен для исследования устойчивости течения с круговыми линиями тока в случае, когда внутренний цилиндр может двигаться под действием сил давления со стороны жидкости.

© В. А. Владимиров, К. И. Ильин, 1994