

ПУЛЬСАЦИИ СКОРОСТИ И ДАВЛЕНИЯ НА ОБТЕКАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ С ЛОКАЛЬНЫМ ПРЕПЯТСТВИЕМ

А. В. ВОСКОВОЙНИК, В. А. ВОСКОВОЙНИК

*Институт гидромеханики НАН Украины
ул. Желябова, 8/4, 03057, Киев, Украина*

Проведены экспериментальные исследования по изучению влияния поперечно обтекаемого углубления и кольцевого препятствия на пограничный слой над пластиной и продольно обтекаемым гибким протяженным цилиндром. Измерены средние и пульсационные скорости в ламинарном и турбулентном пограничном слое над пластиной и в полуцилиндрическом углублении. Представлена структура вихревого течения в углублении. С ростом диаметра кольцевого препятствия интенсивность пульсаций псевдозвукового давления возрастает. Максимальное значение интенсивности наблюдается в ближнем следе препятствия. На расстояниях, превышающих 100 диаметров препятствия, пограничный слой восстанавливается.

ВВЕДЕНИЕ

Локальные препятствия в виде выпуклостей и выемок разнообразной формы на обтекаемой поверхности во многих случаях являются источниками акустических излучений в окружающую среду. Параметры акустических полей зависят от геометрии неоднородности обтекаемой поверхности, режимов обтекания, характеристик среды и ряда других факторов. Локальные препятствия, помещенные в пограничный слой, образуемый на телах обтекания, воздействуют на когерентные вихревые структуры, формирующие этот слой и возбуждающие псевдозвуковые пульсации давления [1, 2]. Кроме того, в выемках и в окрестности выпуклостей образуются присущие им вихревые системы, которые вносят свой вклад в гидродинамический шум. Области отрыва и присоединения пограничного слоя, а также удара слоя смещения о стенку выемки являются зонами повышенных пульсационных полей [3, 4].

1 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Экспериментальные исследования структуры течения над пластиной с углублением проводились в аэродинамической трубе открытого типа. Аэродинамическая труба имела внутренний диаметр $102 \cdot 10^{-3}$ м, а ее измерительный участок (прозрачная цилиндрическая вставка из оргстекла) была длиной около 600 мм. Более подробная информация об экспериментальной установке дана в работе [5].

В осевом сечении измерительного участка аэродинамической трубы, в ее горизонтальной плоскости вдоль продольной оси, монтировалась плоская гидравлически гладкая пластина. На расстоянии $514 \cdot 10^{-3}$ м от носка пластины было сделано полуцилиндрическое углубление радиусом $R=9.25$ мм и длиной $Z=81$ мм. Продольная ось углубления располагалась перпендикулярно скорости набегающего потока U_{∞} (рис. 1).

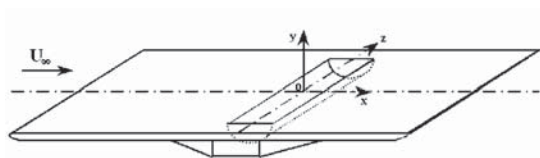


Рис. 1.

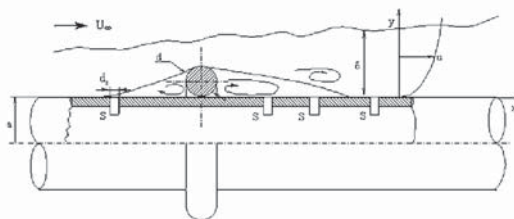


Рис. 2.

В верхней части измерительного участка аэродинамической трубы в специально сделанном люке монтировалось координатное устройство. В нем, через соответствующие державки и узлы крепления, устанавливались проволочные однониточные термоанемометрические датчики. В измерениях использовались датчики из вольфрамовой проволоки диаметром $5 \cdot 10^{-6}$ м и длиной $1 \cdot 10^{-3}$ м. Координатное устройство, оборудованное микрометрическими головками, обеспечивало линейные перемещения датчиков с точностью до $10 \cdot 10^{-6}$ м. В качестве измерительных средств использовался комплект термоанемометрической аппаратуры фирмы Диза, работающей в режиме постоянной температуры.

Исследования проводились при скорости потока U_∞ от 1 м/с до 20 м/с, числе Рейнольдса по длине пластины до переднего края углубления $Re_x = xU_\infty/\nu$ от $3.7 \cdot 10^4$ до $6.7 \cdot 10^5$, толщине пограничного слоя перед углублением δ от $2.6 \cdot 10^{-3}$ м до $7.8 \cdot 10^{-3}$ м и формпараметре $H = \delta^*/\theta$ от 1.3 до 2.6, где ν - коэффициент кинематической вязкости, δ^* - толщина вытеснения, θ - толщина потери импульса.

Изучение влияния локального препятствия на структуру пограничного слоя проводилось на гибкой протяженной буксируемой антенне. На поверхности антенны диаметром $29 \cdot 10^{-3}$ м устанавливались кольцевые препятствия кругового сечения диаметром $1.5 \cdot 10^{-3}$ м, $3 \cdot 10^{-3}$ м и $6 \cdot 10^{-3}$ м, которые обтекались поперечным потоком (рис. 2). Гибкая протяженная антенна длиной $L=20$ м буксировалась в гидродинамическом канале катером, при скорости обтекания 3 и 5 м/с. Миниатюрные пьезокерамические датчики пульсаций давления, диаметром чувствительной поверхности $1.6 \cdot 10^{-3}$ м, устанавливались заподлицо с обтекаемой поверхностью антенны. Более подробная информация о буксировочных исследованиях и параметрах антенны представлена в работе [6].

Погрешность измерений интегральных и осредненных данных составляет не более 10% (доверительный интервал 95%). Погрешность измерений спектральных характеристик не превышала $(1 \div 2)$ дБ в диапазоне частот от 0 Гц до 12.5 кГц для пульсаций скорости и от 2 Гц до 1250 Гц для пульсаций пристеночного давления.

2 РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Наличие локального препятствия на обтекаемой поверхности в виде поперечно обтекаемого полуцилиндрического углубления приводит к определенным изменениям структуры пограничного слоя не только над углублением и позади него, но и перед ним. Обнаружено, что в профилях продольной скорости, измеренных в осевом сечении пластины с углублением, появляются локальные области их искривления. В пограничном слое образуются чередующиеся зоны повышения и понижения средней и пульсационной составляющих продольной скорости, обусловленные воздействием течения, формирующегося внутри углубления. Профиль средней продольной скорости, полученный при

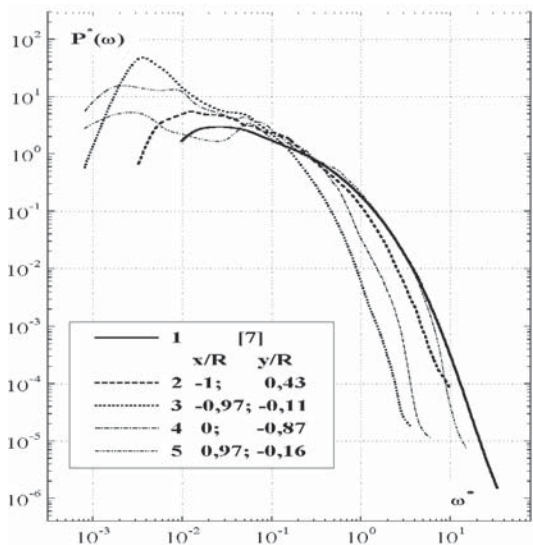


Рис. 3.

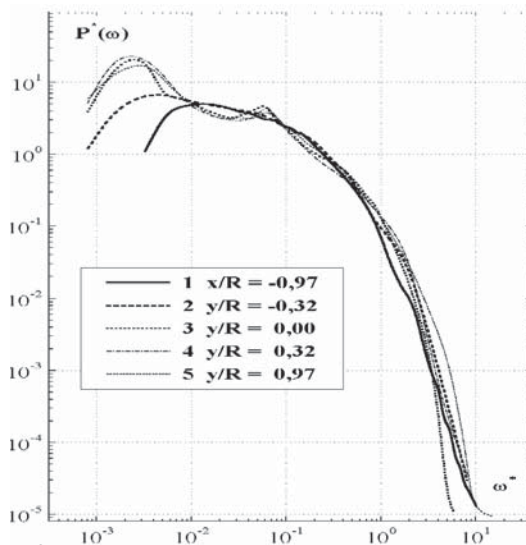


Рис. 4.

скорости обтекания 1 м/с и при числе Рейнольдса в точке отрыва $Re_x = 3.7 \cdot 10^4$ близок к ламинарному профилю Блазиуса. С увеличением скорости обтекания до 10 м/с и 20 м/с и чисел Рейнольдса до $3.4 \cdot 10^5$ и $6.7 \cdot 10^5$ профили скорости приближаются к турбулентному режиму обтекания (закон "одной седьмой") с возрастанием их заполненности при росте U_∞ . С приближением к углублению, независимо от режима обтекания, обнаружено убывание заполненности профилей продольной скорости, указывающее о тормозящем воздействии локального углубления на набегающий поток, особенно на пристеночную область пограничного слоя.

При прохождении переднего края углубления, поток ускоряется для ламинарного режима обтекания, а для турбулентного - тормозится. Далее над углублением чередуются зоны ускорения и торможения для обоих режимов обтекания. Для $U_\infty = 1$ м/с наибольшее значение \bar{U}_{max} наблюдается при $x = -0.3R$ и наименьшее \bar{U}_{min} при $x = 0.8R$, а для пульсационной составляющей скорости u'_{max} при $x = -0.3R$ и u'_{min} при $x = 0$. Для $U_\infty = 10$ м/с соответственно \bar{U}_{max} при $x = 0$ и \bar{U}_{min} при $x = -0.9R$, а u'_{max} при $x = 0.7R$ и u'_{min} при $x = -0.9R$ (на уровне $y = 0.1\delta$). Для $U_\infty = 20$ м/с значение \bar{U}_{max} при $x = 0$ и \bar{U}_{min} при $x = 0.5R$, а u'_{max} при $x = 0.7R$ и u'_{min} при $x = -0.9R$.

Определение продольных и поперечных компонент поля скоростей позволило построить линии равных средних и пульсационных скоростей, завихренности и потока завихренности как в пограничном слое над пластиной с углублением, так и в самом полуцилиндрическом углублении. На основании таких представлений характеристик течения удалось обнаружить квазиустойчивые, в статистическом смысле, вихревые системы, присущие внутренним течениям в исследуемых углублениях. При отрыве пограничного слоя, образующийся слой смешения расширяется в поперечном направлении при продвижении вниз по потоку. Нижняя и верхняя границы слоя смешения имеют волнообразную форму. В области удара о заднюю стенку нижняя часть слоя смешения раздваивается. Одна часть устремляется вверх на выход из углубления, а вторая, которую Роквелл [3] назвал пристеночной струей, вдоль боковой стенки уходит в придонную область углубления. Вблизи кормовой стенки углубления первая часть

слоя смешения встречается с верхней частью слоя смешения и оторвавшимся пограничным слоем, вызывая его торможение и подъем от стенки. Вторая часть слоя смешения проходит придонную область и подымается вверх вдоль передней стенки углубления и, дойдя до области отрыва пограничного слоя, объединяется с вновь формируемым слоем смешения и направляется обратно к кормовой стенке углубления. Эта замкнутая часть внутреннего течения в углублении образует циркуляционную зону, внутри которой формируется крупный квазистойчивый первичный вихрь. При $U_\infty = 1$ м/с первичный вихрь занимает почти половину объема углубления и имеет вытянутую в продольном направлении форму и несколько наклонен относительно продольной оси пластины. При скорости $U_\infty = 10$ м/с циркуляционная зона занимает одну треть объема углубления ближе к кормовой стенке, а при скорости $U_\infty = 20$ м/с первичный вихрь становится еще более компактным и принимает форму эллипса, находясь в нижней кормовой части углубления, подобно наблюдениям [3]. Вблизи угловых краев углубления (оторвного и ударного) формируются вторичные вихри, образующие вихревые пары. С увеличением скорости обтекания в придонной области углубления, возле мест отделения циркуляционной зоны от поверхности углубления или в области столкновения пристеночной струи с низкоскоростной жидкостью вблизи дна углубления (по Роквеллу), появляется еще один источник зарождения вторичных вихрей.

Спектральное представление о поле пульсаций продольной скорости в пограничном слое и внутри углубления может быть получено из рис. 3. Здесь кривая 1 изображает данные [7] для турбулентного пограничного слоя на пластине; кривая 2 - наши результаты в сечении $x=-R$ (перед углублением) для $U_\infty = 20$ м/с и $yu/\delta=0.4$; кривая 3 - измерения внутри углубления при $U_\infty = 20$ м/с и $x/R=-0.97$; $y/R=-0.11$ и $z=0$; кривая 4 - $x=0$; $y/R=-0.87$; $z=0$; кривая 5 - $x/R=0.97$; $y/R=-0.16$; $z=0$. Спектральная плотность мощности пульсаций продольной скорости в турбулентном пограничном слое в диапазоне низких частот растет пропорционально квадрату частоты. На частоте порядка $0.05\delta/2\pi U_\infty$ имеет максимум, а затем убывает в инерционной области обратно пропорционально частоте, а в пристеночной области пропорционально ω^{-3} и даже ω^{-5} [8]. Результаты наших измерений отличаются от данных [7] в области низких частот, из-за воздействия препятствия, а в области высоких частот, из-за повышенной интегрирующей способности используемых нами датчиков, работающих как волновой фильтр. В наших измерениях безразмерная длина нити термоанемометрического датчика, нормированная внутренними переменными на порядок больше длины нити датчиков, используемых в работе [7], что ограничивает их разрешающую способность в области высоких частот. Для внутреннего течения в углублении характерным в спектрах скорости становится смещение энергетики в область низких частот и появление явно выраженных экстремумов (максимумов) в спектральных зависимостях, которые порождаются квазистойчивыми вихрями внутри углубления.

На рис. 4 показаны зависимости спектральных плотностей мощности пульсаций продольной скорости, обезразмеренных внешними переменными и квадратом среднего значения пульсаций скорости, над углублением вдоль поверхности пластины, т.е. $y=0$ и $z=0$, для скорости потока 20 м/с. Кривая 1 соответствует сечению $x/R=-0.97$; кривая 2 - $x/R=-0.32$; кривая 3 - $x=0$; кривая 4 - $x/R=0.32$ и кривая 5 - $x/R=0.97$. В непосредственной близости от зоны отрыва пограничного слоя спектр пульсаций скорости подобен тому, который является характерным именно для турбулентного пограничного слоя (см. кривую 1 на рис. 4 и кривые 1 и 2 на рис. 3). По мере удаления от зоны

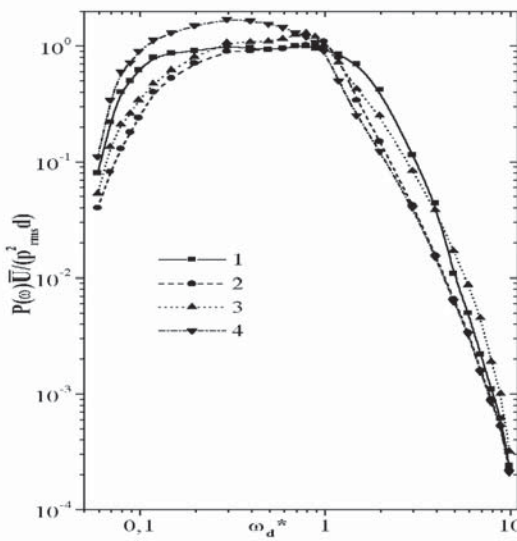


Рис. 5.

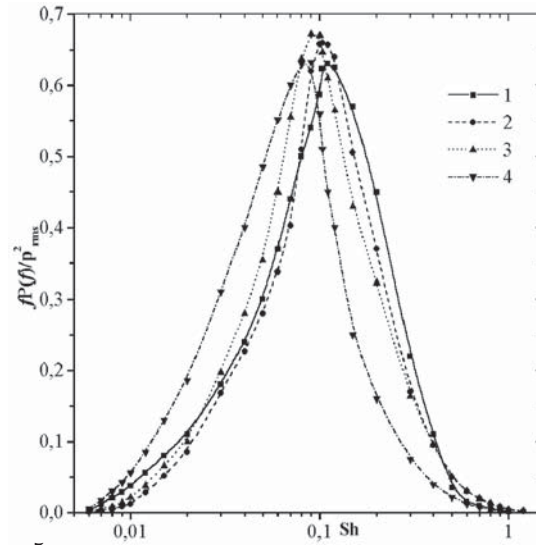


Рис. 6.

отрыва спектральные составляющие в слое смешения более наполняются низкочастотными компонентами. При достижении осевого сечения углубления и далее над кормовой его частью характер поведения спектральных плотностей становится похожим на тот, который имел место для поля скоростей внутри углубления. Установлено, что в сечении $-0.32 < x/R < 0$ происходит выброс вихревой системы из углубления с частотой около $(3 \div 4)$ Гц, что подтверждается нашими визуальными измерениями с помощью дымящейся проволоочки.

На рис. 5 представлены спектральные плотности мощности пульсаций давления, обезразмеренные квадратом среднего значения пульсаций давления в точке измерений и внешними переменными - диаметром кольцевого препятствия и средним значением локальной скорости на уровне диаметра препятствия от обтекаемой поверхности, взятым из профиля скорости пограничного слоя на антенне. Измерения проведены за кольцевыми препятствиями на цилиндре при удалении от носовой части антенны $L_x = 0.3L$. Кривая 1 соответствует диаметру препятствия $d^+ = du_\tau/\nu = 165$ и удалению от препятствия $x/d=4$; кривая 2 - $d^+=330$; $x/d=2$; кривая 3 - $d^+=660$; $x/d = 1$; кривая 4 - $d^+=990$ и $x/d = 1$. Измерения проведены в следующих условиях: $U_\infty = 3$ м/с; $Re_x = 1.7 \cdot 10^7$; $Re_a = 4.3 \cdot 10^4$; $\delta/a=2.8$ - для кривых 1-3 и $U_\infty = 5$ м/с; $Re_x = 2.9 \cdot 10^7$; $Re_a = 7.2 \cdot 10^4$ и $\delta/a=2.3$ - для кривой 4. Средние значения местной скорости $\bar{U} = 0.55U_\infty$ на уровне 1.5 мм от поверхности антенны; $\bar{U} = 0.61U_\infty$ - на уровне 3 мм и $\bar{U} = 0.69U_\infty$ - на уровне 6 мм при $U_\infty = 3$ м/с и $\bar{U} = 0.73U_\infty$ на уровне 6 мм при $U_\infty = 5$ м/с. По оси абсцисс частота представлена в виде $\omega_d^* = \omega d / U_\infty$, в соответствии с рекомендациями [9], согласно которым наилучшим комплексом для обезразмеривания спектральных уровней и частот для поперечно обтекаемого препятствия на антенне является число Струхала $Sh = f d / \bar{U}$. Наибольшие изменения проявляются в низкочастотном диапазоне с экстремумами на частотах срыва вихрей с поперечно обтекаемых препятствий.

С удалением от препятствия наблюдается снижение низкочастотных компонент спектра и нарастание высокочастотных. Это указывает на то, что в следе препятствия происходит трансформация энергии от низкочастотных крупномасштабных вихревых

систем к мелкомасштабным высокочастотным вихрям. При удалении от препятствия на расстояние порядка 100 его диаметров отсутствует разница в значениях спектральных плотностей мощности пульсаций псевдозвуковых давлений в пограничном слое на антенне с препятствием и без него. Следовательно, при $x > 100d$ пограничный слой на антенне восстанавливается.

Распределение удельного вклада различных частотных компонент в полную энергию поля пульсаций давления в ближнем следе препятствия показано на рис. 6. Здесь обозначения кривых соответствуют данным рис. 5. Максимальные значения первых моментов спектральных плотностей превышают величину 0.6 на частотах, соответствующих числу Струхала 0.1, что говорит о наличии узкополосного или явно выраженного источника пульсаций псевдозвукового давления в ближнем следе препятствия. Источником таких пульсаций являются срывающиеся с поверхности локального препятствия вихри. С увеличением диаметра препятствия и скорости обтекания число Струхала убывает. Отсюда, для отрывного обтекания локального препятствия, установленного во внутреннюю область турбулентного пограничного слоя на антенне, и обтекаемого при докритическом числе Рейнольдса ($2.5 \cdot 10^3 \leq Re_d = d\bar{U}/\nu \leq 2.2 \cdot 10^4$) число Струхала обратно пропорционально числу Рейнольдса, согласно данным [9].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате экспериментальных исследований установлено, что локальные препятствия на обтекаемой поверхности вносят возмущающее воздействие на поля пульсаций скорости и псевдозвукового давления пограничного слоя.

Наличие поперечно обтекаемого полуцилиндрического углубления на обтекаемой плоской поверхности приводит к торможению потока перед углублением как при ламинарном, так и турбулентном режимах обтекания, особенно во внутренней области пограничного слоя. Над углублением наблюдаются чередующиеся области торможения и ускорения набегающего потока.

Внутри углубления формируется квазиустойчивый крупномасштабный вихрь, форма, размер и местоположение которого зависит от режима обтекания и вторичные мелкомасштабные вихри, число которых растет с увеличением скорости обтекания.

Спектральные плотности мощности пульсаций продольной скорости в углублении характеризуются повышенным содержанием низкочастотных компонент. В спектральных зависимостях появляются явно выраженные экстремумы, которые обусловлены присутствием квазиустойчивых вихрей в углублении.

Для поперечно обтекаемого кольцевого препятствия, расположенного во внутренней области развитого турбулентного пограничного слоя на гибкой протяженной буксируемой антенне, наибольшее возрастание интенсивности поля пульсаций псевдозвукового давления наблюдается в ближнем следе препятствия. В этой области имеет место рост спектральных плотностей мощности пульсаций пристеночного давления в области низких частот. Наибольший удельный вклад в полную энергию поля пульсаций псевдозвукового давления вносят срывающиеся вихревые системы на частотах, соответствующих числу Струхала порядка 0.1. Для докризисного режима обтекания препятствий число Струхала обратно пропорционально числу Рейнольдса. При удалении от препятствия более 100 его диаметров пограничный слой на антенне восстанавливается.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Rockwell D.* Vortex-body interactions // *Annu. Rev. Fluid Mech.*– 1998.– V. 30.– P. 199–229.
2. *Bull M. K.* Wall-pressure fluctuations beneath turbulent boundary layers: Some reflections on forty years of research // *Sound Vibr.*– 1996.– V. 190, N 3.– P. 299–315.
3. *Lin J.C., Rockwell D.* Organized oscillations of initially turbulent flow past a cavity // *AIAA J.*– 2001.– V. 39, N 6.– P. 1139–1151.
4. *Чжен П.* Отрывные течения. В 3 т.– М: :, Мир.– , с. 1972916 с.
5. *Бабенко В. В., Воскобойник А. В., Воскобойник В. А., Турик В. Н.* Поле пульсаций скорости в пристеночной струе вихревой камеры // *Вибрации в технике и технологиях.*– 2003.– Т. 28, N 2.– С. 105–110.
6. *Воскобойник А. В., Воскобойник В. А., Макаренко А.П.* Влияние локального препятствия на структуру поля пульсаций давления // *Вісник Донецького ун-ту, Сер. А: Природничі науки.*– 2002.– Вып. 1.– С. 170–175.
7. *Metzger M. M., Klewicki J. C.* A comparative study of near-wall turbulence in high and low Reynolds number boundary layers // *Phys. Fluids.*– 2001.– V. 13, N 3.– P. 692–701.
8. *Смольяков А. В.* Вычисление спектров псевдозвуковых флуктуаций пристеночных давлений в турбулентных пограничных слоях // *Акустический журнал.*– 2000.– Т. 46, N 3.– С. 401–407.
9. *Воскобойник В. А., Гринченко В.Т., Макаренко А.П.* Псевдозвук за препятствием на продольно обтекаемом цилиндре // *Акустичний вісник.*– 2002.– Т. 5, N 1.– С. 22–36.