

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ ГИДРОМЕХАНИКИ

На правах рукописи

Воскобойник Владимир Анатольевич

ПУЛЬСАЦИИ ПРИСТЕНОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ ТУРБУЛЕНТНОГО
ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ, ОБРАЗОВАННОГО ПРИ ОБТЕКАНИИ
ГИБКОГО ПРОТЯЖЕННОГО ЦИЛИНДРА

01.02.05 - Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Киев - 1993

ЛННБ України ім. В. Стефаніка



00802677 (U)

AB 28. 189

Работа выполнена в Институте гидромеханики АН Украины.

Научный руководитель - член-корреспондент АН Украины,
доктор физико-математических наук,
профессор

ГРИНЧЕНКО В. Т.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук

БАБЕНКО В. В.

кандидат физико-математических наук

ЛАВРИНЕНКО В. Н.

Ведущая организация - Донецкий университет

Защита состоится "28" октября 1993 г. в "14" часов
на заседании специализированного совета Д 016.04.01 в
Институте гидромеханики АН Украины по адресу: 252057,
г. Киев, ул. Желябова 3/4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института
гидромеханики АН Украины.

Автореферат разослан "28" сентября 1993 г.

Ученый секретарь
специализированного совета
доктор технических наук

КРИЛЬ С. И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Исследование турбулентных пограничных слоев, образованных при обтекании поверхностей, представляет одну из важнейших задач гидромеханики, гидросакустики, океанографии и ряда других отраслей науки и техники. Турбулентный пограничный слой, по существу, очень неустойчивое явление, создает локальные пульсации скорости и давления, массы и температуры, обусловленные центробежными силами вращающихся вихрей, кориолисовыми силами и различными видами микроскопических сил, вызванных взаимодействием вихрей. Поле пульсаций давления турбулентного пограничного слоя представляет собой сложный случайный процесс, который подчиняется определенным статистическим закономерностям и его модельное представление одна из основных проблем теоретической гидромеханики. Наличие и взаимодействие вихревых структур в пограничном слое, их масштабы и скорости переноса, а также сама физическая модель турбулентного пограничного слоя привлекают пристальное внимание многих исследователей.

Прикладные аспекты исследования турбулентного пограничного слоя связаны с разработкой современных технических устройств, повышением эффективности и экономичности различных видов транспортных средств и гидродинамических систем, а связи с чем приобретает чрезвычайно важное значение проблема снижения гидродинамического шума, обусловленного пульсациями пристеночного давления. Для решения ряда технических задач широкое применение находят устройства сложной геометрии. Оптимизация которых с точки зрения минимума гидродинамического шума требует детального исследования структуры турбулентного пограничного слоя. До настоящего времени нет законченной физической модели, охватывающей все особенности турбулентного пограничного слоя. Существуют также статистические модели поля пульсаций давления турбулентного пограничного слоя, образованного при обтекании осесимметричных тел.

Цель работы. Получение статистических характеристик поля пристеночных пульсаций давления турбулентного пограничного слоя, образованного при обтекании гибких протяженных цилиндров; выяснение влияния на статистические характеристики числа Рейнольдса, поперечной кривизны обтекаемой поверхности и угла атаки; разработка статистической модели поля пульсаций давления турбулентного пограничного слоя; исследование масштабов, кинематических характеристик когерентных вихревых структур и создание физической модели турбулентного пограничного слоя, имеющего место при обтекании гибких протяженных цилиндров.

Научная новизна. 1. Сообщены и получены осредненные параметры турбулентного пограничного слоя, развитого на продольно обтекаемом гибком цилиндре. 2. Исследованы статистические характеристики пограничного слоя. 3. Определено влияние поперечной кривизны обтекаемой поверхности и угла атаки на статистические характеристики. 4. Создана статистическая модель поля пульсаций давления турбулентного пограничного слоя на гибком протяженном цилиндре. 5. Определены масштабы, скорости переноса и времена "жизни" когерентных вихревых структур. 6. Разработана физическая модель турбулентного пограничного слоя, имеющего место при обтекании гибкого цилиндра.

Практическая ценность. Разработанная методика исследований турбулентного пограничного слоя пригодна для фундаментальных исследований в различных областях гидромеханики и гидроакустики. Представленные характеристики поля пульсаций давления турбулентного пограничного слоя, а также статистическая и физическая модели турбулентного пограничного слоя позволяют познать процессы, происходящие в пограничном слое, контролировать их и управлять ими при решении большого числа фундаментальных и прикладных задач в гидродинамике и гидроакустике.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на IV Всесоюзном симпозиуме по физике акусто-гидродинамических явлений и оптоакустике в г. Ашхабаде в 1985 г., на Всесоюзной конференции "Проблемы комплексной автоматизации гидрофизических исследований" в

г. Севастополь в 1989 г., на III Всесоюзной конференции "Вихри и турбулентность в океане" в г. Калининграде в 1990 г., на XI Всесоюзной акустической конференции в г. Москве в 1991 г., на научных семинарах в ЦАГИ и в Институте гидромеханики АН Украины.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка используемой литературы. Общий объем работы составляет 174 стр., из которых 109 стр. машинописного текста, 40 стр. с 40 рисунками, список литературы 241 наименование на 26 стр.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность настоящих исследований, формулируется их цель, новизна и практическая ценность. Кратко изложено содержание диссертационной работы.

В первой главе представлены результаты исследований пульсаций давления турбулентного пограничного слоя на гибком продольно обтекаемом цилиндре.

В §1.1 дано физическое обоснование решаемой задачи и метод определения осредненных характеристик турбулентного пограничного слоя. Подробно рассматриваются модели турбулентного пограничного слоя от однослойной до четырехслойной, даются их преимущества и недостатки, а также указываются механизмы взаимодействия между структурами, образующими пограничный слой. Для расчета осредненного течения в пограничном слое на цилиндре предлагается использовать четырехслойную модель турбулентного пограничного слоя, состоящую из

1) вязкого подслоя, $0 < y^+ < 7$, где преобладают молекулярные процессы переноса и профиль скорости определяется как

$$u^+ = y^+(1+y^+/2a^+) \quad (1)$$

где $u^+ = U/u_*$; $y^+ = \eta u_*^2/\nu$; $a^+ = a u_*^2/\nu$; u_* - продольная скорость,

x_2 - координата в направлении нормали к обтекаемой поверхности, u_2 - динамическая скорость, a - радиус цилиндра, ν - коэффициент кинематической вязкости;

2) буферной зоны, $7 < y^+ < 30$, где касательное напряжение, обусловленное молекулярной вязкостью, уменьшается, а напряжение Рейнольдса быстро растет, здесь профиль скорости можно вычислить из

$$y^+(1+y^+2a) = u^+ \exp(-kV) [\exp(ku^+) - 1 - ku^+ - (ku^+)^2/2 - (ku^+)^3/6] \quad (2)$$

где $k = 0,4$; $V = 5,10$ - для гладкого цилиндра и для шероховатого $V = -(\ln k_w^+)/k + 8,5$; $k_w^+ = k_w \nu / a$; k_w - высота шероховатости;

3) логарифмической области, $30 < y^+ < 1000$, где наблюдается наибольшая турбулентная активность и профиль скорости определяется из

$$u^+ = (1/k) \ln[y^+(1+y^+2a)] + V \quad (3)$$

4) внешней области, $1000 < y^+ < \delta^*$, составляющей около 80% толщины пограничного слоя, а профиль скорости можно вычислить из

$$\frac{(U_2 - U_1)/u_2}{\delta^*} = -(1/k) \ln[y^+(1+y^+2a)/\delta^*] + [\pi(x)/k] \{1 + \cos[\pi y^+(1+y^+2a)/\delta^*]\} \quad (4)$$

где $\delta^* = \delta u_2 / \nu$; δ - толщина пограничного слоя на цилиндре; $\pi(x) = 0,62$.

Толщину пограничного слоя и касательное напряжение на поверхности обтекаемого цилиндра предлагается определять из зависимостей

$$\delta^* = a \sqrt{(18,5 [Re_2 / (Re_2)^{0,384} + 0,5]^2 + 2 - 1)} \quad (5)$$

$$\tau_w = c_f \rho u_2^2 = 0,413 \rho u_2^2 (Re_2)^{-0,2} (Re_2)^{-0,222} \quad (6)$$

где $Re_x = xU/\nu$; $Re_d = dU/\nu$; $q = \rho U^2/2$; ρ - плотность среды. Толщина вытеснения пограничного слоя $\delta^* = \delta/6,5$.

В §1.2 описаны экспериментальная установка и методика проведения исследований пульсаций давления турбулентного пограничного слоя на гибком продольно обтекаемом цилиндре. Для проведения исследований была специально спроектирована и изготовлена модель, представляющая собой гибкий цилиндр диаметром 29 мм и длиной около 20 м, которая буксировалась в канале на полигоне Института гидромеханики АН Украины. Заподлицо с обтекаемой поверхностью модели в измерительной секции устанавливались пьезокерамические датчики пульсаций давления с диаметром чувствительной поверхности 1,8 мм. Регистрация сигналов, поступающих от датчиков, производилась с помощью комплекта аппаратуры датской фирмы Бриль и Кьер.

В §1.3 представлены статистические характеристики турбулентного пограничного слоя на гибком продольно обтекаемом цилиндре. Экспериментально установлено, что при проведении исследований с датчиками пульсаций давления диаметром чувствительной поверхности $d^* = dU/\nu > 200$ функции плотности вероятностей турбулентных пульсаций давления соответствуют гауссовскому закону распределения и являются статистически однородными и стационарными случайными величинами, т.е., пульсации давления турбулентного пограничного слоя на гибком цилиндре представляют собой эргодический случайный процесс.

Измерение функций пространственно - временной корреляции позволило установить, что скорость вырождения максимальных значений коэффициента корреляции на гибком цилиндре оказывается не столь высокой, как на жестком цилиндре (в 1,5 раза ниже), хотя является и выше, чем на пластине (на 30%). Широкополосный корреляционный анализ позволил качественно оценить время "жизни" вихревых давлениеобразующих структур в пограничном слое. Мелкомасштабные вихревые структуры, обуславливающие высокочастотные компоненты турбулентного поля, имеет меньшее время "жизни", чем низкочастотные крупномасштабные структуры. Скорость переноса вихревых структур на гибком цилиндре выше, чем

на жестком цилиндре или пластине и на разделениях между датчиками пульсаций давления порядка $100 \delta^\circ$ удалось зарегистрировать скорость переноса близкую к скорости свободного потока.

Спектральный анализ пристеночных пульсаций давления позволил установить, что интенсивность пульсаций давления турбулентного пограничного слоя, созданного на гибком цилиндре, выше на (15-20)% по сравнению с пластиной и с жестким цилиндром. Спектральные уровни пульсаций давления на гибком цилиндре в полосе частот $0,1 < \omega \delta U_\infty < 20$ пропорциональны скорости в степени 2,6. Спектр мощности пульсаций давления турбулентного пограничного слоя на гибком цилиндре практически не зависит от местоположения регистрирующего датчика по длине цилиндра от 400 до 1300 x/a , а с увеличением скорости обтекания происходит перераспределение турбулентных пульсаций из области частот $0,7 < \omega \delta U_\infty < 10$ в низкочастотную область. Взаимные спектральные характеристики показывают, что в турбулентном пограничном слое, образованном на гибком продольно обтекаемом цилиндре, доминирующее значение играют крупномасштабные вихревые структуры, которые обуславливают максимальное значение как функции когерентности, так и спектра мощности пристеночных пульсаций давления. Фазовая конвективная скорость с ростом частоты монотонно убывает от значения равного скорости набегающего потока до величины близкой к $0,6 U_\infty$. С увеличением Re_δ фазовая конвективная скорость растет, главным образом, в области низких частот, причем на телах с поперечной кривизной она выше, чем на пластинах, из-за большей наполненности профиля скорости на цилиндрической поверхности по сравнению с плоской.

Во второй главе представлены исследования пульсаций пристеночного давления на гибких продольно обтекаемых цилиндрах различной кривизны и цилиндрах, обтекаемых под углами атаки.

В §2.1 представлены результаты влияния кривизны гибкого продольно обтекаемого цилиндра на поле пульсаций пристеночного давления. Для этого были проведены исследования с цилиндрическими моделями, на которых отношение δ/a составляло от 2 до 7. Установлено, что акусто-гидродинамический коэффициент с изме-

нением кривизны цилиндра не изменяется, а коэффициент Крейчана возрастает с увеличением диаметра цилиндра, поскольку интенсивность пристеночных пульсаций давления остается практически неизменной в исследуемом диапазоне значений B/a . С увеличением поперечной кривизны гибкого продольно обтекаемого цилиндра нормированный спектр мощности уменьшается в диапазоне частот $0,2 < \omega d/U_\infty < 5$ и возрастает в области высоких частот $\omega^* > 15$. Ограниченная поперечная протяженность осесимметричного пограничного слоя и увеличение заполненности профиля скорости турбулентного пограничного слоя с ростом поперечной кривизны обтекаемой поверхности приводит к уменьшению размеров энергосодержащих мелкомасштабных вихревых структур вблизи стенки. Фазовая конвективная скорость для осесимметричных тел с большей поперечной кривизной выше.

В §2.2 рассматривается влияние угла атаки обтекания гибкого протяженного цилиндра на пульсации пристеночного давления. При увеличении угла атаки от 0° до 8° спектр мощности пульсаций пристеночного давления возрастает в области низких частот. Коррелированность вихревых структур по образующей цилиндра с увеличением угла атаки обтекания падает, оставляя практически неизменной частоту $\omega d/U_\infty = 1,5$, при которой наблюдается максимум функции когерентности. Фазовая конвективная скорость растет с увеличением угла атаки в области низких частот и асимптотически приближается к скорости переноса, полученной при продольном обтекании цилиндра в области высоких частот. По окружности цилиндра, обтекаемого под углом атаки, наибольшее значение спектра мощности пульсаций давления в области низких частот ($\omega d/U_\infty < 5$) наблюдается в кормовой части и наименьшее — в плоскости перпендикулярной скорости потока. На высокочастотные мелкомасштабные давлениеобразующие вихревые структуры изменение угла атаки обтекания (до 8°) не оказывает влияния.

Глава 3 посвящена построению статистической модели поля пульсаций давления турбулентного пограничного слоя на гибком протяженном цилиндре. Для построения модели рассмотрен ряд модельных представлений поля пульсаций давления, среди которых

модели Коркоса, Фоукс Вильямса, Чейза, Смольякова и Ткаченко и ряд их модификаций. Расчетные данные, полученные из этих моделей, сопоставляются с экспериментальными результатами, наблюдаемыми при обтекании гибких цилиндров. В итоге, модель Чейза принята за основу при построении статистической модели поля пульсаций давления турбулентного пограничного слоя. Но в модели Чейза вместо конвективной скорости, зависящей от частоты и разделения между датчиками, применяемой в качестве параметра обезразмеривания, предлагается использовать скорость потока. Кроме того, результаты, получаемые из модели Чейза, не согласуются с экспериментальными данными как с нашими, так и с данными Влэяка, Бредшоу и другими в высокочастотной области спектра мощности и поэтому вводится дополнительный множитель, упрощающий это несоответствие. В результате предложено следующее модельное представление статистических характеристик поля пульсаций давления :

1) взаимный спектр мощности

$$P(\vec{f}, w) = a_0^2 w^2 \exp(inw\delta^2/U) \{ \rho_1^2 \exp(-z) [z+1 + \mu^2(1-z^2/z) + 12\alpha_1 \mu z] + \rho_2^2 \exp(-z) [z+1 + \mu^2(1-z^2/z) + 12\alpha_2 \mu z] \} * [1+(cw\delta^2/U)]^{-1} \quad (7)$$

2) спектр мощности

$$P(w) = a_0^2 w^2 \{ \rho_1^2 [1+\mu^2] + \rho_2^2 [1+\mu^2] \} [1+(cw\delta^2/U)]^{-1} \quad (8)$$

3) функция когерентности

$$\gamma^2(f_1, w) = |P(f_1, w)|^2 / [P_1(w)P_2(w)] = a_0^2 w^2 [1+(cw\delta^2/U)]^{-2} \{ \rho_1^2 \exp(-z) [z+1 + \mu^2(1-z^2)] + \rho_2^2 \exp(-z) [z+1 + \mu^2] \}^2 + 4\mu^2 \{ \rho_1^2 \alpha_1 z \exp(-z) + \rho_2^2 \alpha_2 z \exp(-z) \}^2 / [P(w)]^2 \quad (9)$$

4) фазовая конвективная скорость

$$u_\varphi = U \exp[-0,2(w\delta^2/U)^2] \quad (10)$$

где $\alpha_j^2 = 1 + (b_j \delta^2 / U_0^2)$; $z_{j1} = \mu \alpha_j n w_{j1}^2 / U_0$; $z_{j2} = \alpha_j n w_{j2}^2 / U_0$; $z_j^c = z_{j1}^2 z_{j2}^2$ $j = M, T$;
 $b_M = 2b$; $\xi = 1 - \xi$; $\delta^* = (\delta_M^* + \delta_T^*) / 2$; $n = 1,67$; $a_r = 2,0$; $b_r = 2,38$; $r_r =$
 $= 0,24$; $\mu = 0,15$; $c = 0,075$.

В главе 4 представлена физическая модель турбулентного пограничного слоя на гибком протяженном цилиндре. На основании экспериментальных данных, представленных в первых двух главах диссертационной работы, и из анализа модельных представлений Кляйна, Рейнольдса, Корино, Бродки, Брауна, Томаса, Салько и других о структуре турбулентного пограничного слоя предложена как сама модель погранслоя, так и указаны типы когерентных вихревых структур, их взаимодействие и расположение в пограничном слое. Даны масштабы этих когерентных структур, времена "жизни" и скорости переноса. Так турбулентный пограничный слой, образованный при обтекании гибкого протяженного цилиндра, состоит из мелко- и крупномасштабных вихревых структур. В пристеночной области, в вязком подслое зарождаются мелкомасштабные низкоскоростные когерентные структуры, которые представляют собой вращающиеся в противоположных направлениях продольные вихри - струйки. По мере продвижения вниз по потоку струйки увеличиваются в поперечном размере, поднимаются от обтекаемой поверхности и начинают колебаться. В буферной зоне струйки жидкости, достигнув больших амплитуд колебания и увеличив свое поперечное сечение, внезапно искажаются, расширяются и выбрасываются вверх. Масштабы струек: продольный до $1000 \nu / u_\tau$, поперечный от $(2-5) \nu / u_\tau$ в головной части до $(20-50) \nu / u_\tau$ в хвостовой. Расстояние между струйками около $80 \nu / u_\tau$.

Выброшенная часть колеблющейся продольно ориентированной вихревой струйки претерпевает значительные изменения в буферной и частично логарифмической зонах пограничного слоя разрушаясь и объединяясь с соседними массами эжектирующей жидкости. Из этих остатков когерентных структур формируются новые поперечно ориентированные вихревые структуры, обладающие большой энергией. Такие вихревые структуры, также как и струйки относятся к мелкомасштабным пристеночным вихревым структурам. Их

линейные размеры не превышают $(200-500) \nu/u_*$, а скорости переноса - порядка $0,65 U_*$.

Мелкомасштабные вихри взаимодействуют как друг с другом, так и с крупномасштабными когерентными вихревыми структурами, обмениваются с ними энергией, распадаются и объединяются, создавая более крупные образования, которые, перемещаясь дальше от стенки, обладают более высокой скоростью переноса. Образованные крупномасштабные вихри представляют собой поперечно ориентированные вихревые структуры несколько вытянутые в продольном направлении и наклоненные к обтекаемой поверхности под углом близким к 18° . Масштабы этих вихрей можно охарактеризовать следующим образом: продольный от $0,5\delta$ до 6δ , поперечный от $0,1\delta$ до $2,5\delta$ и толщина или высота по направлению нормали к обтекаемой поверхности от $0,1\delta$ до $0,8\delta$. Эти крупномасштабные вихревые структуры перемещаются со скоростями переноса порядка $(0,8-0,95) U_*$. При обтекании цилиндров крупномасштабные когерентные структуры ограничены продольным масштабом порядка $6,2\delta$ и если их поперечный размер превышает длину окружности цилиндра, т. е., $2ka$, то наибольшие вихри смыкаются над поверхностью обтекаемого цилиндра, образуя "тороидальные" вихревые системы. Период появления таких "тороидальных" вихрей близок к периоду выбросов и равен $6,4\delta/U_*$ и переносятся эти вихри со скоростями порядка $(0,85-0,95) U_*$. До своего распада они проходят расстояние около 14δ .

На задней стороне крупномасштабных вихревых структур образуются типичные вихри или вихри Фалько, обладающие большой энергией и высокой скоростью переноса, близкой к скорости потока. Их масштаб оценивается в $(100-200)$ длин вязкости. Появление типичных вихрей приводит к искривлению поверхности крупномасштабных вихревых структур. Относительно малый радиус кривизны внешней фронтальной части крупномасштабной структуры и высокая кинетическая энергия типичных вихрей приводит к тому, что в этой области пограничного слоя происходят отрывы частей крупномасштабной структуры. Срывающиеся вихревые системы частично уносятся за пределы турбулентного пограничного слоя, та-

ким образом, стабилизируя толщину пограничного слоя для высоких чисел Рейнольдса по длине цилиндра, а также перемещаясь до направления к обтекаемой поверхности между двумя соседними крупномасштабными структурами, подпитывая энергией пристеночный слой.

Следовательно, турбулентный пограничный слой, образующийся при обтекании цилиндра, представляет собой довольно интересное и сложное физическое явление, состоящее из мелкомасштабных и крупномасштабных изгерентных вихревых структур. Эти структуры заполняют весь пограничный слой, взаимодействуя и образуя друг друга. Они обмениваются между собой энергией и порождают пульсационные поля, как на обтекаемой поверхности, так и по толщине пограничного слоя.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

1. Для выяснения физических процессов, происходящих в турбулентном пограничном слое, образующимся при обтекании гибких цилиндров, разработаны методики, созданы экспериментальные установки и проведены научные исследования по измерению поля пульсаций пристеночного давления.

2. Исследованы статистические характеристики поля пульсаций пристеночного давления турбулентного пограничного слоя, образующегося при обтекании гибкого пружинного цилиндра. Получены и проанализированы корреляционные и спектральные функции пульсаций давления.

3. На основании анализа экспериментальных и теоретических исследований получены аналитические зависимости осредненных характеристик пограничного слоя, развитого при обтекании цилиндрических тел.

4. Исследовано влияние диаметра цилиндра и угла атаки, под которым обтекает гибкий протяженный цилиндр, на статистические характеристики пульсаций пристеночного давления. Получено распределение спектральных и корреляционных характеристик как по длине, так и по окружности цилиндра для различных

чисел Рейнольдса.

5. Предложена статистическая модель поля пульсаций пристеночного давления турбулентного пограничного слоя, образованного при обтекании гибкого протяженного цилиндра. Проведено сопоставление расчетных значений статистических характеристик с данными, полученными в экспериментальных исследованиях.

6. Из анализа теоретических и экспериментальных работ предложена методика и получены данные о параметрах когерентных вихревых структур, о их скоростях переноса, времени "жизни". Отмечены механизмы взаимодействия и обмена энергией между когерентными вихревыми структурами.

7. Предложена физическая модель турбулентного пограничного слоя, развитого при обтекании гибкого протяженного цилиндра. Указаны типы вихревых структур, образующих пограничный слой, их масштабы и скорости переноса.

Основные результаты диссертационной работы отражены в следующих публикациях :

1. Адамов А. М., Виноградный Г. П., Воскобойник В. А., Макаренков А. П. Гидродинамические шумы и вибрации гибкого продольно обтекаемого цилиндра // IV Всесоюз. симпозиум по физико-акусто-гидродинамическим явлениям и оптоакустике с секциями молекулярной акустики и песакустики : Тез. докл. - Алма-Ата, 1985 С. 41.

2. Виноградный Г. П., Воскобойник В. А., Уринченко В. Г., Макаренков А. П. Спектральные и корреляционные характеристики турбулентного пограничного слоя на гибком протяженном цилиндре // Изв. АН СССР, Мех. жидк. и газа. - 1989. - N 5. С. 49-54.

3. Виноградный Г. П., Воскобойник В. А., Макаренков А. П. Статистические характеристики псевдозвука на поверхности гибкого цилиндра // Проблемы комплексной автоматизации гидрофизических исследований : Тез. докл. Всесоюз. конф. май 1989. - Севастополь, 1989. С. 98.

4. Воскобойник В. А., Макаренков А. П. Вихревые структуры в турбулентном пограничном слое на гибком протяженном цилиндре // Вихри и турбулентность в океане : Тез. докл. III Всесоюз.

конф. 14-19 мая 1990. - Калининград, 1990. С. 64.

5. Воскобойник В. А., Макаренко А. П. Влияние кривизны продольно обтекаемого цилиндра на пульсации пристеночного давления // Пульсации давления на обтекаемой поверхности : Тез. докл. семинара "Авиационная акустика", ЦАГИ, 20-24 мая 1991. - М., 1991. С. 15-18.

6. Воскобойник В. А., Макаренко А. П. Влияние угла атаки на псевдощавк турбулентного пограничного слоя гибкого цилиндра // Доклады XI Всесоюз. акустич. конф. Серия 3. - М., 1991. С. 13-16.

Подписано к печати 14.09.1993 г. Формат 60x84/16

Бумага офсетная Усл.-печ. лист. 1,0 Уч.-изд. лист. 1,0

Тираж 100 Заказ 840. Бесплатно

Полиграф. уч-к Института электродинамики АН Украины,
252057, Киев-57, проспект Победы, 56.

ЛИБ. им. В. Стефани
АН Украины

403471

AB 28.189