

УДК 533.6.011(045)

¹С.А. Ищенко, д.т.н., проф.
²А.А. Бондарец, к.т.н.**ВЛИЯНИЕ ВИБРАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ,
ОМЫВАЕМОЙ ПОЛУОГРАНИЧЕННОЙ СТРУЕЙ,
НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЕ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ**¹Национальный авиационный университет
²Институт органической химии НАН Украины
E-mail: wind-tunnel-research@yandex.ru

Представлены результаты экспериментального исследования влияния вибрации пластины, омываемой полуограниченной струей, на характеристики ее пограничного слоя.

Наведено результати експериментального дослідження впливу вібрації пластини, що омивається напівобмеженим струменем, на характеристики його прилежового шару.

The result of the experimental investigation on the influence of the plate's vibration on characteristics of boundary layer which is formed by near plate jet has been presented in the article.

Постановка проблемы

Реальное перемещение летательного аппарата, подводной лодки в потоке жидкости (газа) происходит с вибрацией поверхности. Изучение этого факта позволит оптимизировать процессы обтекания аппарата, решить вопросы управления пограничным слоем.

Целью работы является исследование влияния вибрации поверхности, омываемой набегающим потоком, на характеристики пристенного течения.

Попытки использования вибрации для управления пограничным слоем делались и ранее. Так, в работе [1] изучалась возможность затягивания отрыва потока при положительных градиентах давления усилением обмена импульсов между его слоями, путем использования вибрирующей пластинки.

Вибрирующая с большой частотой и малой амплитудой поверхность, по мнению авторов, способна оттолкнуть (сколоть) вязкий подслой, тем самым резко уменьшить сопротивление трения движущегося объекта.

Экспериментальная установка

Экспериментальная установка [2] представляет собой аэродинамическую трубу прямого действия, снабженную инжектором — устройством выдува тангенциальной пристенной струи (рис. 1).

Нижняя стенка рабочей части трубы приводится в движение вибростендом, состоящим из таких элементов:

- системы управления СУВ-1 (рис. 2, а);
- усилителя УПВ-1,5 А (рис. 2, б);
- вибратора ВЭД-100 А (рис. 2, в).

Схема размещения вибропластины в рабочей части трубы и ее основные геометрические данные показаны на рис. 3.

Динамические перемещения и формы колебаний исследуемой пластины были определены по результатам измерений среднеквадратичных значений виброускорений в различных точках поверхности пластины.

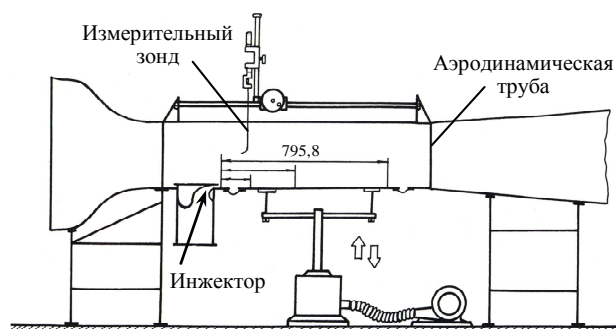


Рис. 1. Рабочая часть трубы для исследования пристенных струй на вибрирующих плоскостях

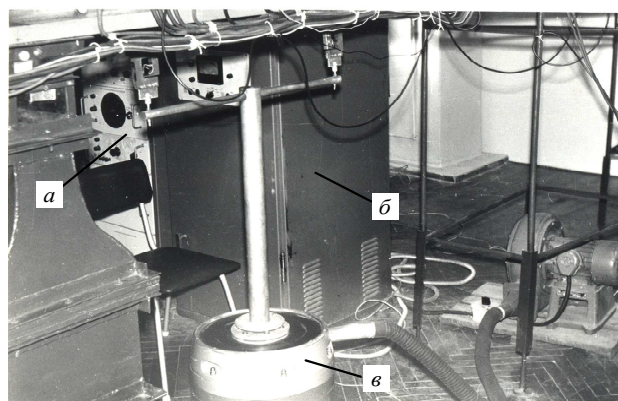


Рис. 2. Общий вид экспериментальной установки:
а — система управления;
б — усилитель;
в — вибратор

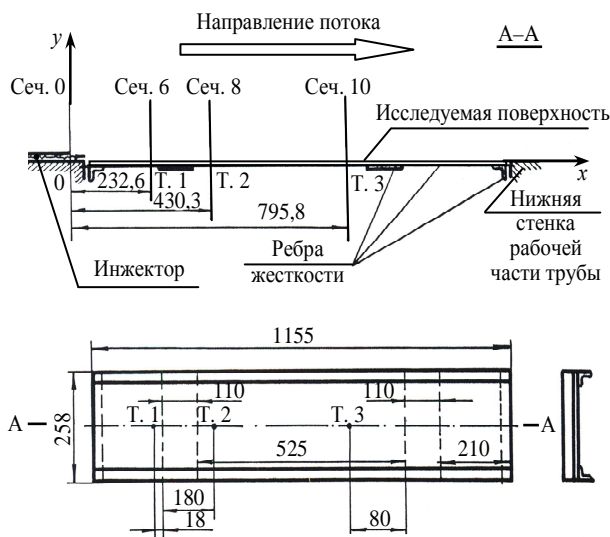


Рис. 3. Схема размещения вибропластины в рабочей части трубы

Уровни ускорений были зарегистрированы с помощью датчиков (акселерометров) KB10 фирмы MMF, сигнал от которых передавался на измеритель VM 20 MMF и вольтметр эффективных значений 2427 фирмы Брюль и Кьер.

Для проведения спектрального анализа сигнал, поступающий от датчиков, записывался на магнитофон фирмы UHER и обрабатывался третьоктавным спектроанализатором 2114 фирмы Брюль и Кьер.

Для измерения скорости и её продольной пульсационной составляющей использовали термоанемометр фирмы DISA Electronic.

Величину динамических перемещений \bar{s} (в дальнейшем для упрощения s) системы, совершающей установившиеся вынужденные колебания, для амплитуд, меньших $3 \cdot 10^{-2}$ мм определяли по номограмме пересчета [3]

$$\bar{s} = \frac{a}{f^2 \delta},$$

где a – ускорение;

f – частота возмущающей силы;

δ – толщина пластины.

Для амплитуд больших 0,5 мм, динамические перемещения s были определены по замыканию электрической цепи в момент контакта пластины и подводимого к ней координатным устройством щупа.

Исследуемая затопленная струя омывала пластину:

– закрепленную неподвижно (серия 1);
– вибрирующую с различной частотой при фиксированных значениях амплитуды $s = 0,5 \cdot 10^{-3}$ мм (серия 2);

– вибрирующую с различной амплитудой при фиксированных значениях частоты $f = 40$ Гц; $f = 200$ Гц (серия 3).

Контрольное сечение, в котором задавался требуемый режим вибрации, находилось на расстоянии $x = 233$ мм от среза сопла.

Режимы вибрации в других сечениях отличались от заданного в контрольном из-за конечной жесткости пластины. При этом фиксировали их фактическое значение.

Анализ экспериментальных данных

Поскольку пластина имела конечную жесткость, предварительно была исследована ее реакция на изменение интенсивности возбуждающей колебания силы.

Измеренные низкочастотные третьоктавные спектры виброускорений в различных точках исследуемой пластины (рис. 4) позволили проследить реакцию конструкции на действие внешней силы при различной частоте вынужденных колебаний (рис. 5, 6). На рис. 6 стрелкой показано направление ее возрастания.

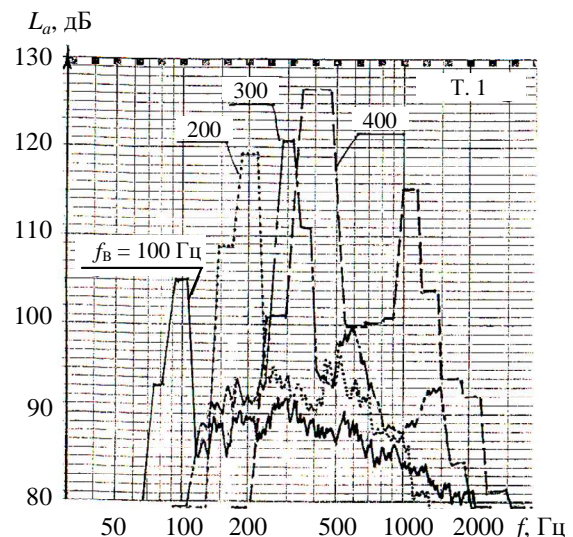


Рис. 4. Спектры виброускорений при вынужденных колебаниях пластины:

L_a – уровень виброускорений (относительно $a_0 = 10^{-5}$ м/с²);

f – частота колебания пластины;

f_B – частота внешней силы, возбуждающей колебания пластины

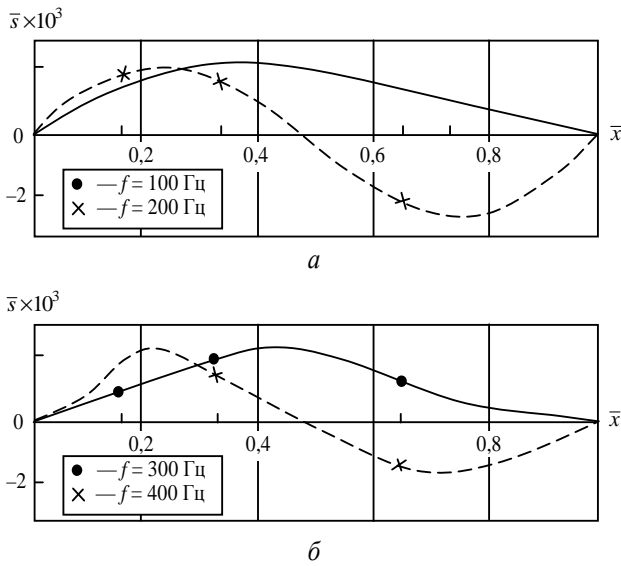


Рис. 5. Динамические перемещения пластины при различной частоте возбуждающей силы:
 а - $f = 100$ Гц, $f = 200$ Гц;
 б - $f = 300$ Гц, $f = 400$ Гц

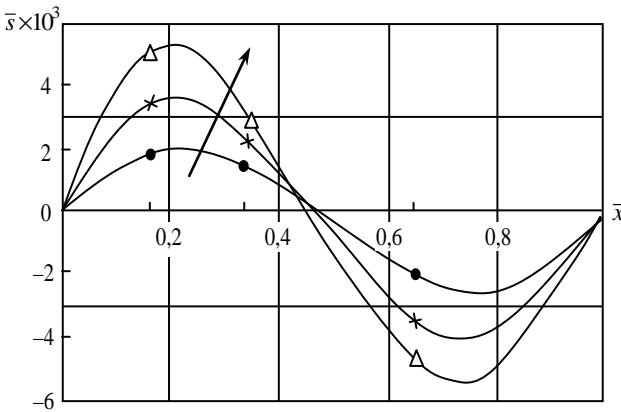


Рис. 6. Реакция пластины на увеличение возмущающей силы при фиксированной частоте колебаний ($f = 200$ Гц)

Результаты исследования интенсивности турбулентности продольной пульсационной составляющей скорости и средней скорости в сечениях на различных расстояниях от среза сопла для стационарного положения пластины (серия 1) показаны на рис. 7:

$$\text{Re}_0 = \frac{U_0 y_c}{\nu};$$

$$\text{Re}_0 = 0,17 \cdot 10^5,$$

где U_0 — скорость выдува струи;
 y_c — высота сопла.

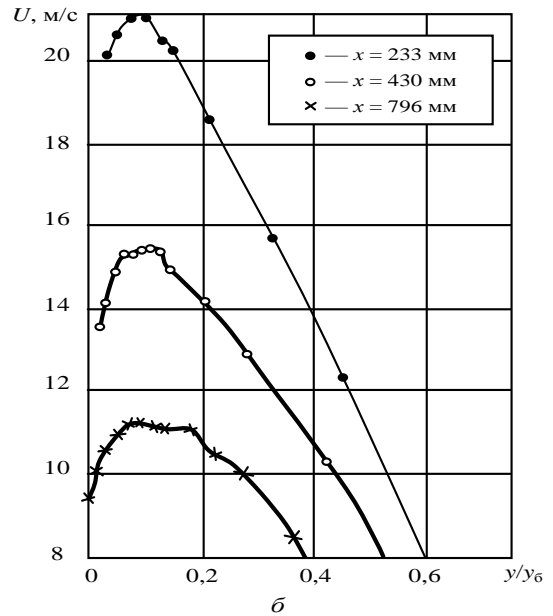
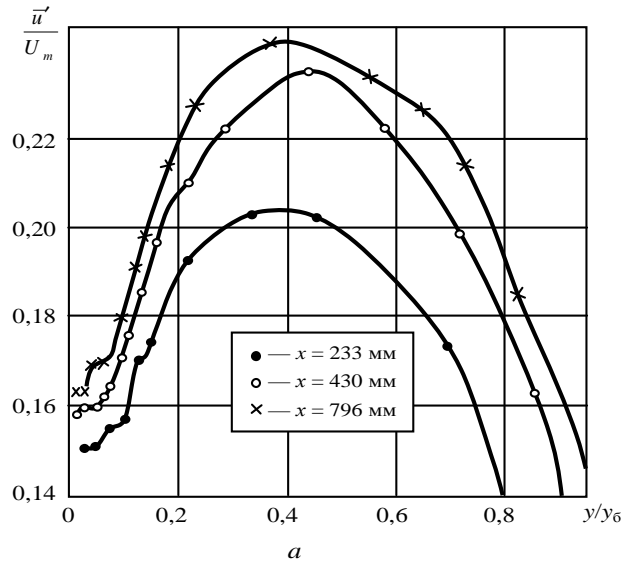


Рис. 7. Профили интенсивности турбулентности (а), и скорости (б):

\bar{u}' — среднее квадратичное значение продольной по оси x , пульсационной составляющей скорости;
 U_m — максимальная скорость струи в рассматриваемом сечении;
 U — скорость струи в рассматриваемой точке профиля скорости

Для анализа экспериментальных данных удобно разделить полученные результаты на две условные группы в зависимости от масштаба перемещения, где характеристики течения ведут себя по-разному:

- микроперемещения
- $5 \cdot 10^{-3} \leq s \leq 6,4 \cdot 10^{-3}$ мм;

– макроперемещения

$$0,5 \leq s \leq 5 \text{ мм.}$$

Результаты исследования интенсивности турбулентности и скорости в сечении $x = 233 \text{ мм}$ для различных значений частот при фиксированных значениях перемещений (серия 2) показаны на рис. 8, 9.

Минимальное сопротивление движущемуся потоку оказывает пластина, вибрирующая с частотой $f=300 \text{ Гц}$ при микроперемещении $s = 5 \cdot 10^{-3} \text{ мм}$ (рис. 8).

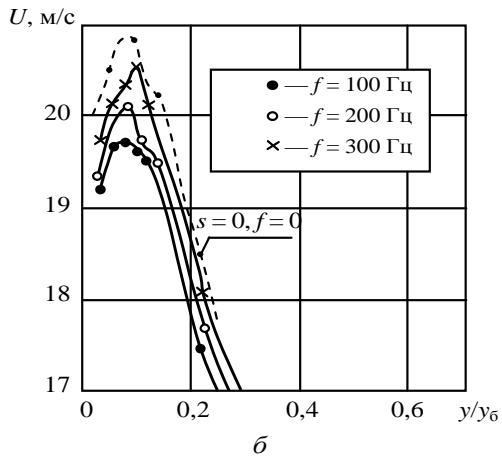
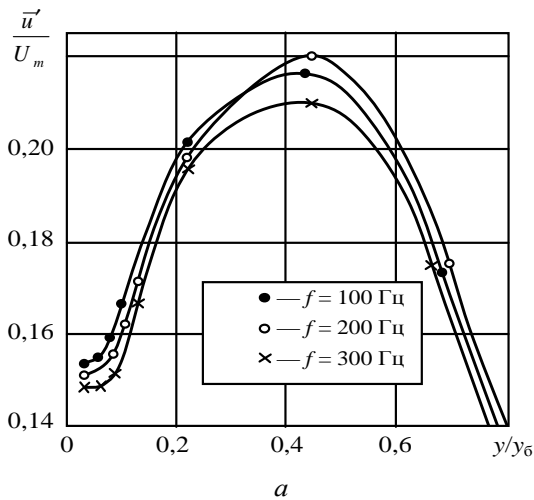


Рис. 8. Профили интенсивности турбулентности (а) и скорости (б) для различных частот при фиксированном микроперемещении

Уменьшение частоты при том же микроперемещении до $f=100 \text{ Гц}$ приводит к возрастанию сопротивления трения и, как следствие, падению скорости потока. Интенсивность турбулентности при этом возрастает.

Отчетливое смещение профилей скорости и интенсивности турбулентности для различных частот наблюдается (рис. 9) при вибрации пластины с макроперемещением $s = 0,5 \text{ мм}$.

Однако уменьшение частоты вибрации с $f = 120 \text{ Гц}$ до $f = 40 \text{ Гц}$ приводит в отличие от рассмотренного случая к уменьшению сопротивления трения и возрастанию скорости набегающего потока. Интенсивность турбулентности при этом уменьшается (рис.9, а).

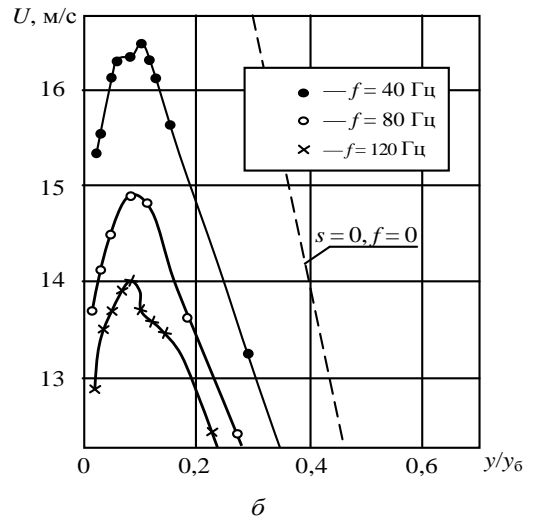
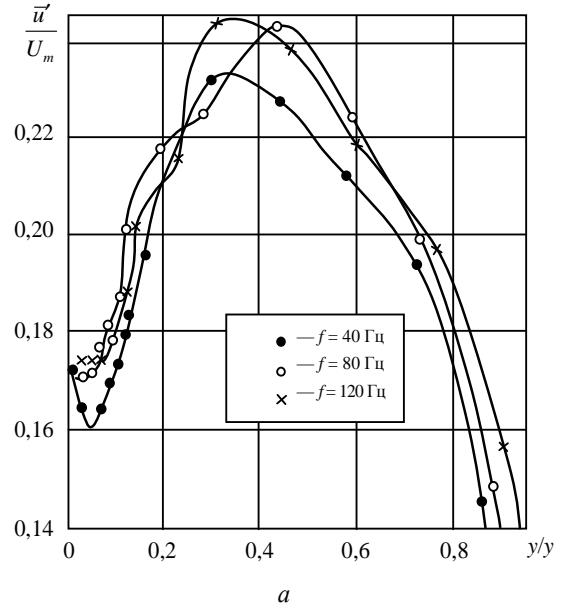


Рис. 9. Профили интенсивности турбулентности (а) и скорости (б) для различных частот при фиксированном макроперемещении

Как показал эксперимент, общие закономерности развития полуограниченной струи в диапазоне чисел Рейнольдса, рассчитанных по

местной скорости и расстоянию от среза сопла, для различных частот при фиксированном значении микроперемещений одни и те же:

$$Re_0 = 0,35 \cdot 10^6 \div 0,68 \cdot 10^6 \quad (x = 233 \div 796 \text{ мм}).$$

Распределения $\frac{\bar{u}'}{U_m}$ и U в сечении $x = 233$ мм для

различных значений перемещений при фиксированных частотах (серия 3) показаны на рис. 10, 11.

В зависимости от масштаба перемещения характеристики полуограниченной струи ведут себя противоположно:

– при увеличении значения макроперемещения с $s = 0,5$ мм до $s = 5$ мм при фиксированной частоте $f = 40$ Гц скорость падает, а интенсивность турбулентности увеличивается (рис. 10);

– при увеличении микроперемещений с $s = 4,9 \cdot 10^{-3}$ мм до $s = 14,6 \cdot 10^{-3}$ мм при фиксированной частоте $f = 200$ Гц скорость набегающего потока возрастает, а интенсивность турбулентности падает (рис. 11).

Подобное поведение скорости и интенсивности турбулентности при фиксированной частоте и меняющихся значениях макроперемещений можно наблюдать и для сечений $x = 430$ мм; $x = 796$ мм.

В работе [4] А. Сигалла приводит формулу, описывающую распределение максимальной скорости в затопленной струе для чисел Рейнольдса, рассчитанных по скорости выдува U_0 и высоте сопла y_c :

$$Re_0 = \frac{U_0 y_c}{\nu};$$

$$Re_0 = 2,8 \cdot 10^3 \div 6,25 \cdot 10^4;$$

$$\frac{U_m}{U_0} = 3,45 \left(\frac{y_c}{x} \right)^{0,5}. \quad (1)$$

Результаты Зерба и Селна в этом же диапазоне чисел Рейнольдса описываются выражением [4]:

$$\frac{U_m}{U_0} = 2,8 \left(\frac{y_c}{x} \right)^{0,5} \quad (2)$$

Различие между выражениями (1), (2) А. Сигалла объясняет особенностями конструкций инжекторов, в частности, величиной поджатия сопла.

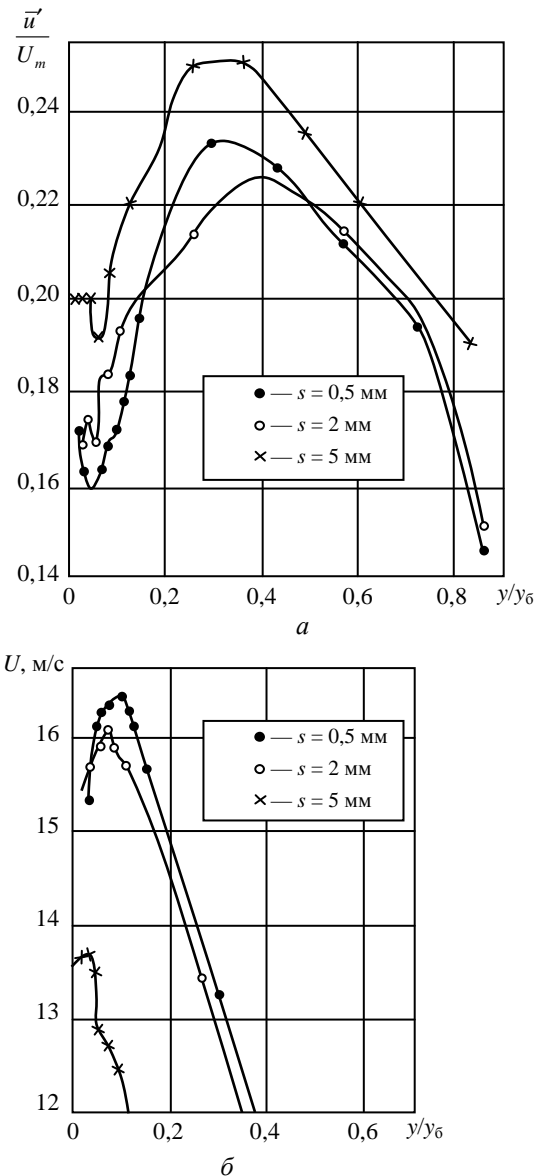


Рис. 10. Профили интенсивности турбулентности (а) и скорости (б) для различных значений макроперемещений при фиксированной частоте

Протяженность границ, где формулы (1), (2) действуют вниз по течению по данным работы [3]:

$$L = (15 \div 150) y_c.$$

Экспериментальные данные соответствуют этому диапазону чисел Рейнольдса:

$$Re = 1,7 \cdot 10^4$$

и протяженности границ действия формул:

$$x = 233 \div 796 \text{ мм},$$

что при $y_c = 7$ мм соответствует

$$L = (33 \div 114) y_c.$$

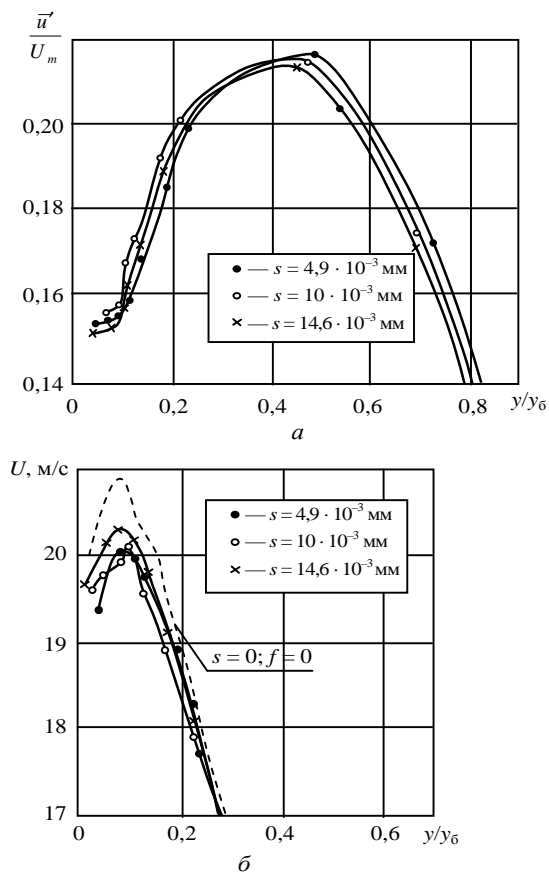


Рис. 11. Профили интенсивности турбулентности (а) и скорости (б) для различных значений микроперемещений при фиксированной частоте

Таким образом, структура формулы, описывающей приведенный эксперимент для стационарной пластины, должна быть такой же, как структура формул (1), (2), за исключением постоянного коэффициента.

Действительно, экспериментальные данные, показанные на рис. 12, а в виде зависимости

$$\frac{U_m}{U_0} \sqrt{\frac{x}{y}} = f\left(\frac{x}{y_c}\right),$$

хорошо аппроксимируются выражением

$$\frac{U_m}{U_0} = 3,85 \left(\frac{y_c}{x}\right)^{0,5}.$$

Для сравнения поджатие соплового аппарата в работе Зерба и Селна $n=10$ [3], используемого в приведенном эксперименте – $n=21$.

Для пластины, вибрирующей с перемещением $s = 5 \cdot 10^{-3}$ мм и различными частотами, экспериментальные данные (рис. 12, б) удовлетворительно описываются выражением

$$\frac{U_m}{U_0} = [3,01 + 0,6f] \left(\frac{y_c}{x}\right)^{0,45},$$

где $f = 0,1 \cdot 10^3 \div 0,3 \cdot 10^3$ Гц.

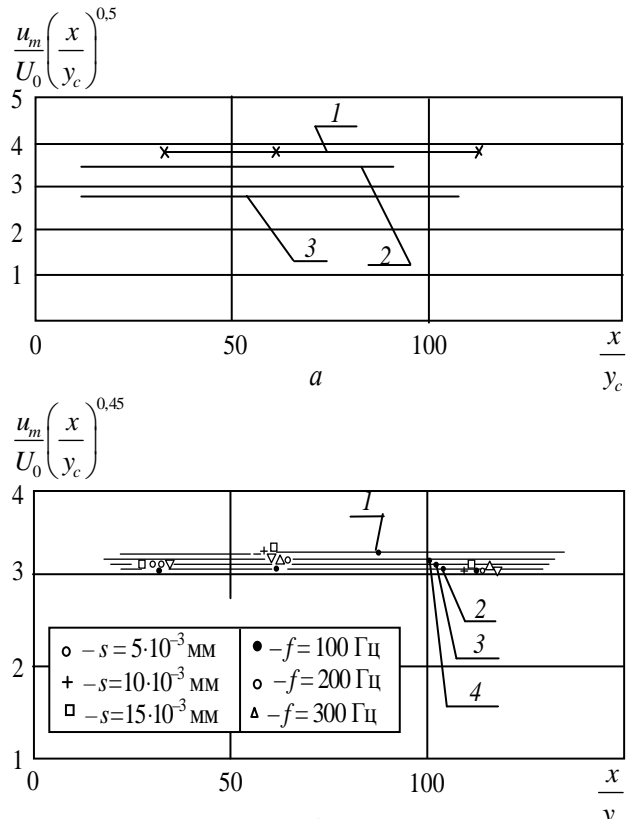


Рис. 12. Распределение максимальной скорости полуограниченной струи вдоль неподвижной (а) и вибрирующей (б) пластин:

а: 1: $\frac{U_m}{U_0} = 3,85 \left(\frac{y_c}{x}\right)^{0,5};$

2: $\frac{U_m}{U_0} = 3,45 \left(\frac{y_c}{x}\right)^{0,45};$

3: $\frac{U_m}{U_0} = 2,8 \left(\frac{y_c}{x}\right)^{0,45}.$

б: 1: $\frac{U_m}{U_0} = 3,21 \left(\frac{y_c}{x}\right)^{0,45};$

2: $\frac{U_m}{U_0} = 3,19 \left(\frac{y_c}{x}\right)^{0,45};$

3: $\frac{U_m}{U_0} = 3,13 \left(\frac{y_c}{x}\right)^{0,45};$

4: $\frac{U_m}{U_0} = 3,07 \left(\frac{y_c}{x}\right)^{0,45}$

Для пластины, вибрирующей с частотой $f=200$ Гц и различными величинами перемещений, экспериментальные данные (рис.12, б), удовлетворительно аппроксимируются выражением

$$\frac{U_m}{U_0} = [3,09 + 8s] \left(\frac{y_c}{x} \right)^{0,45},$$

где $s = 5 \cdot 10^{-3} \div 15 \cdot 10^{-3}$ мм.

Выводы

1. Определен диапазон частот и перемещений вибрирующей пластины, где ее гидравлическое сопротивление меньше (больше), чем для неподвижной пластины. Показано, что вибрирующая с большой частотой и малой амплитудой поверхность способна оттолкнуть (сколоть) вязкий под-слой.

2. Получены эмпирические зависимости, удовлетворительно описывающие распределение максимальной скорости полуограниченной струи на неподвижной и вибрирующей поверхностях.

Литература

1. Майу Дж.Дж. Влияние частоты колебаний пластины на течение в возмущенном турбулентном пограничном слое / Дж.Дж. Майу, Чжень М.Х., Чжоу Дж.Х. // *Аэрокосмическая техника*. – 1991. – № 12, дек. – С. 60–68.
2. Бондарец А.А. Экспериментальная установка для исследования пристенных струй / А.А. Бондарец. – Деп. в ЦНТИГА, 27.10.87, №578 га 87. – 40 с.
3. *Standards, Formulas and Charts Excerpts from international standartization on acoustical and mechanical measurements*. DK-2850. Noerum. Denmark. – 25 p.
4. Sigalla A. Experimental date on turbulent wall jets // *Aircraft Eng.* – 1958. – №5. – P. 41–48.

Стаття надійшла до редакції 20.04.10.