

УДК 533.6.011(045)

¹С.А. Ищенко, д.т.н, проф.
²А.А. Бондарец, к.т.н.

**ПОЛУЭМПИРИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ
МЕЖДУ ТУРБУЛЕНТНЫМИ КАСАТЕЛЬНЫМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ,
КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИЕЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ И СОСТАВЛЯЮЩИМИ
ИНТЕНСИВНОСТИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ДЛЯ ПОЛУОГРАНИЧЕННОЙ СТРУИ**

¹Национальный авиационный университет
²Институт органической химии НАН Украины
E-mail: wind-tunnel-research@yandex.ru

Исследованы пульсационные составляющие скорости, их корреляции в пристенных струях, распространяющиеся в спутном потоке на гладких и шероховатых поверхностях.

Досліджено пульсаційні складові швидкості, їх кореляції в пристінних струменях, що розповсюджуються в супутньому потоці на гладких та шорстких поверхнях.

The fluctuating components of velocity and their correlation for turbulent jets that spread in a moving stream on the smooth and roughness surfaces were investigated.

Постановка проблемы – установление связи между экспериментально полученными значениями турбулентной кинетической энергии, пульсационными составляющими интенсивности турбулентности и касательным напряжением для полуограниченной струи на гладкой и шероховатой поверхностях.

В работе [1] Харша и Ли предприняли попытку установить связь между экспериментально полученными значениями турбулентной кинетической энергии k и касательным напряжением τ . Ими была предложена линейная зависимость для пограничных слоев, струй и следов:

$$\tau = A \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}), \quad (1)$$

где A – постоянная ($A = 0,3$);

$\overline{u'}$, $\overline{v'}$, $\overline{w'}$ — среднеквадратичные значения проекций пульсационной скорости на оси x , y , z .

Уравнение (1) можно переписать в виде

$$-\overline{u'v'^+} = A(k^+);$$

$$k^+ = \frac{1}{2} (\overline{u'^+2} + \overline{v'^+2} + \overline{w'^+2}), \quad (2)$$

$$\overline{u'v'^+} = \frac{\overline{u'v'}}{U_\infty^2};$$

$$\overline{u'^+} = \frac{\overline{u'}}{U_\infty};$$

$$\overline{v'^+} = \frac{\overline{v'}}{U_\infty};$$

$$\overline{w'^+} = \frac{\overline{w'}}{U_\infty},$$

где $\overline{u'v'}$ – одноточечная корреляция среднеквадратичного значения проекций пульсационной скорости в вертикальной плоскости;

U_∞ – скорость свободного потока в исследуемом сечении.

В работе [2] Алшамани показал, что между k^+ и $\overline{u'v'}$ нет линейной зависимости, но выполняется равенство

$$k^+ = A \overline{u'} + B \quad (3)$$

Цель работы – исследование возможности применения выражений (2),(3) для полуограниченных струй, использование соотношения между кинетической энергией турбулентности, нормальной составляющей интенсивности турбулентности $\overline{v'^+}$ в качестве альтернативного выражению (3).

Экспериментальная установка

Использованная экспериментальная установка [3] представляет собой аэродинамическую трубу прямого действия с устройством вдува вторичного потока.

Установка позволяет создавать полуограниченные струи в спутном потоке с различной конфигурацией эпюры скорости на гладкой и шероховатых поверхностях (рис. 1, 2).

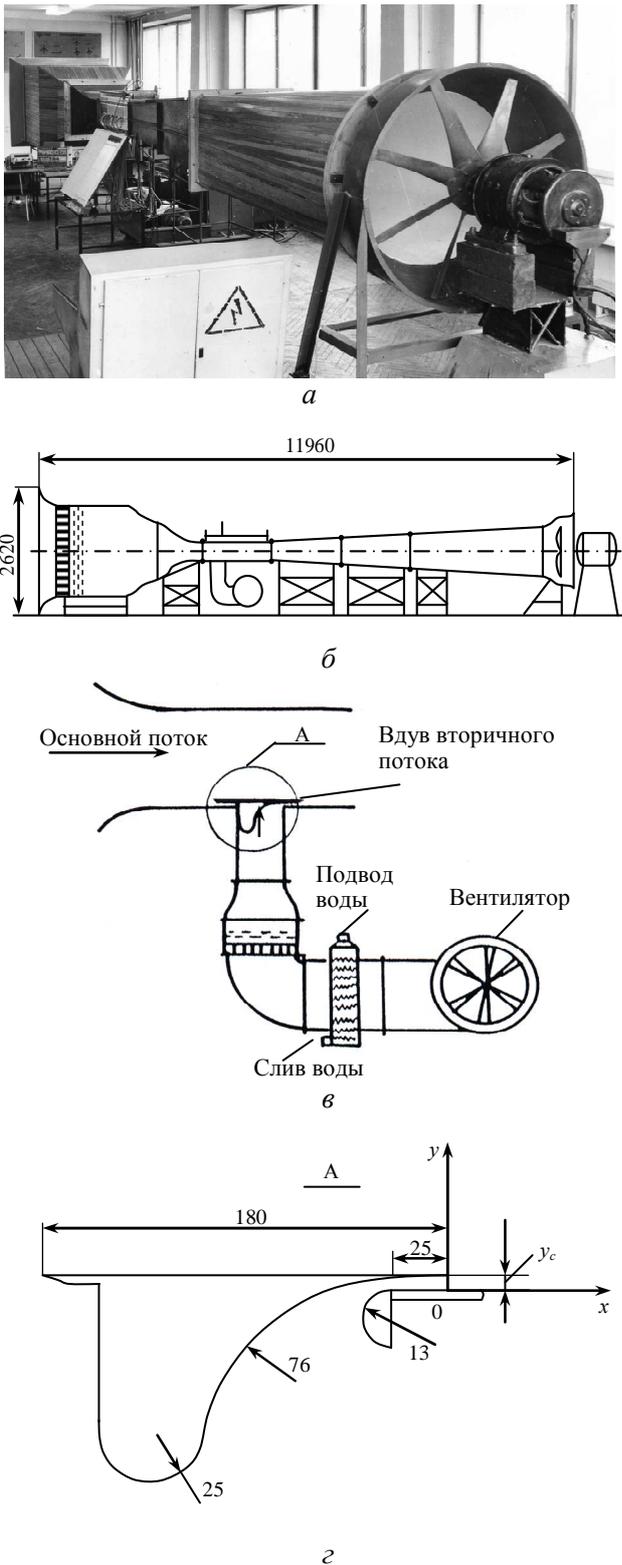


Рис. 1. Экспериментальная установка для создания полугораниченных струй: *a* – внешний вид; *б* – схема установки; *в* – устройство вдува вторичного потока; *г* – конфигурация слоттера, формирующего пристенную струю

Размеры поперечного сечения рабочей части трубы 400x400 мм², размах 1500 мм. Исследовались гладкая и шероховатые поверхности с продольным и поперечным оребрением. Элементы шероховатости – ребра квадратного сечения с размерами 1x1 мм² и шагом 1 мм.

Для измерения компонент пульсаций скорости \bar{u}' , \bar{v}' и их одноточечных корреляций $\overline{u'v'}$ использовали метод скрещенных нитей [4], реализуемый с помощью X-образного двухниточного датчика и двухканального термоанемометра фирмы «DISA Electronic». Как и в работе [5], принимали $\bar{v}' = \bar{w}'$ в пределах точности эксперимента.

Анализ экспериментальных данных

Зависимости турбулентного касательного напряжения от турбулентной кинетической энергии в полугораниченной струе на гладкой и шероховатых поверхностях при $x = 50$ мм, $y_c = 7$ мм показаны на рис. 3.

Как показывают результаты эксперимента, выражение (2) в общем случае не выполняется. Лишь отдельные участки кривой

$$\frac{\overline{u'v'}}{U_\infty^2} = f\left(\frac{k}{U_\infty^2}\right)$$

частично соответствуют выражению (2) в пристенной, струйной и следной частях полугораниченной струи. Причем для поверхности с поперечным и продольным оребрением такое соответствие наблюдается только в струйных частях на участке $\bar{y}_m < \bar{y} < \bar{y}_{min}$ (рис. 2).

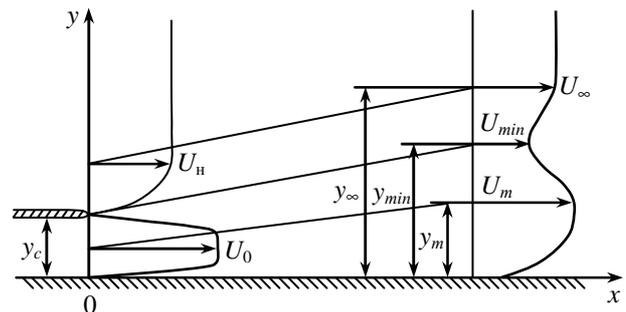


Рис. 2. Эпюра скорости полугораниченной струи:

U_0 – скорость вторичного потока на срезе сопла ($x = 0$);

U_n – скорость основного потока в начальном сечении ($x = 0$);

U_∞ – скорость невозмущённого потока

в исследуемом сечении;

x – расстояние от среза сопла вниз по течению;

y_c – высота сопла устройства вдува вторичного потока

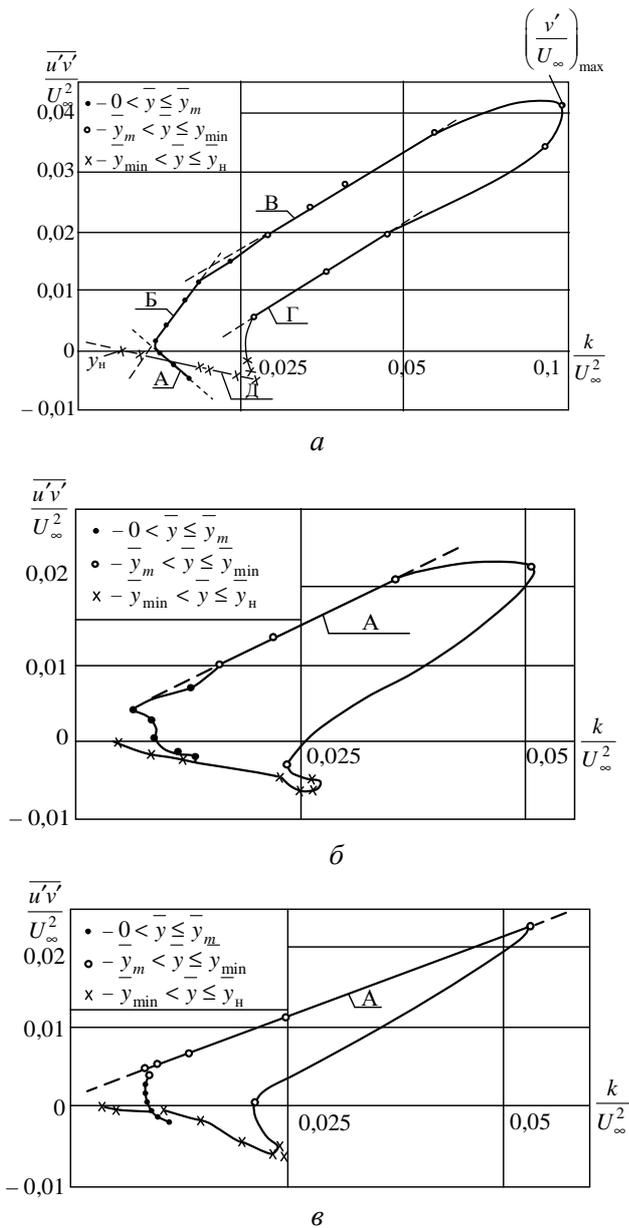


Рис. 3. Зависимость $\frac{\overline{u'v'}}{U_\infty^2} = f\left(\frac{k}{U_\infty^2}\right)$:

- a – гладкая стенка:
 $U_0 = 42,3 \text{ м/с}, U_H = 22,3 \text{ м/с};$
- б – стенка с поперечными ребрами:
 $U_0 = 41,9 \text{ м/с}, U_H = 21,5 \text{ м/с};$
- в – стенка с продольными ребрами:
 $U_0 = 42,5 \text{ м/с}, U_H = 22,3 \text{ м/с}$

Для полуограниченной струи на гладкой стенке (рис. 3, a) при

$$Re_0 = \frac{U_0}{\nu} x, Re_0 = 1,45 \cdot 10^5, m_0 = 0,53$$

(x – расстояние от среза сопла до исследуемого сечения, $m_0 = \frac{U_0}{U_H}$) экспериментальные данные хорошо аппроксимируются следующими выражениями:

1) для пристенной части струи:

– участок A (рис. 3, a)

$$\frac{\overline{u'v'}}{U_\infty^2} = -\frac{k}{U_\infty^2} + 0,01;$$

$$0 < \bar{y} < \bar{y}\left(\frac{k}{U_\infty^2}\right)_{1\min}; \tag{4}$$

– участок B (рис. 3, a):

$$\frac{\overline{u'v'}}{U_\infty^2} = 1,57 \frac{k}{U_\infty^2} - 0,017;$$

$$\bar{y}\left(\frac{k}{U_\infty^2}\right)_{1\min} < \bar{y} < \bar{y}_m; \tag{5}$$

2) для струйной части струи:

– участок B (рис. 3, a)

$$\frac{\overline{u'v'}}{U_\infty^2} = 0,625 \frac{k}{U_\infty^2} + 0,001;$$

$$\bar{y}_m < \bar{y} < \bar{y}\left(\frac{k}{U_\infty^2}\right)_{1\max}; \tag{6}$$

– участок Г (рис. 3, a):

$$\frac{\overline{u'v'}}{U_\infty^2} = 0,657 \frac{k}{U_\infty^2} - 0,013;$$

$$\bar{y}\left(\frac{k}{U_\infty^2}\right)_{1\max} < \bar{y} < \bar{y}_{\min}; \tag{7}$$

3) для следной части струи участок Д (рис. 3, a)

$$\frac{\overline{u'v'}}{U_\infty^2} = -0,243 \frac{k}{U_\infty^2} - 0,0015;$$

$$\bar{y}\left(\frac{k}{U_\infty^2}\right)_{2\max} < \bar{y} < 1, \tag{8}$$

где $\left(\frac{k}{U_\infty^2}\right)_{1\min}, \left(\frac{k}{U_\infty^2}\right)_{1\max}, \left(\frac{k}{U_\infty^2}\right)_{2\max}$ – точки пер-

вого минимума турбулентной кинетической энергии, первого максимума, второго максимума зависимости

$$k = f\left(\frac{y}{y_\delta}\right),$$

при перемещении от стенки в свободный поток (рис. 4);

$$\bar{y} = \frac{y}{y_\infty},$$

y – ордината рассматриваемой точки на эпюре скорости (рис. 2) с соответствующим индексом;
 y_∞ – текущая толщина пограничного слоя.

Экспериментальные данные, показанные на рис. 4, для коэффициента спутности $\frac{U_0}{U_H} = 1,89$ получены авторами, для $\frac{U_0}{U_H} = 1,33$ – взяты из работы [5].

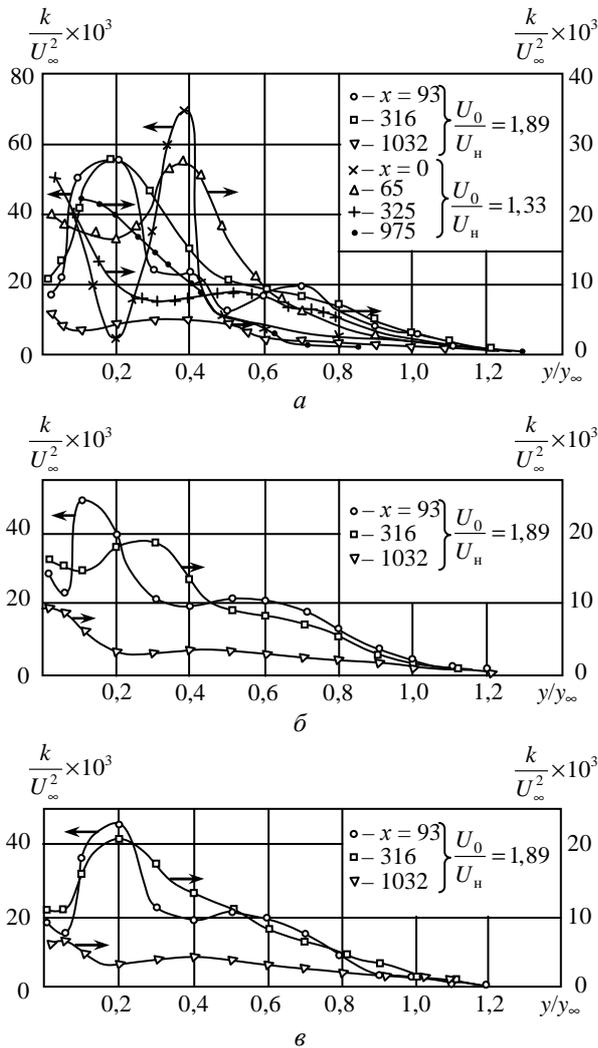


Рис. 4. Распределение турбулентной кинетической энергии:
 а – гладкая поверхность;
 б – поверхность с поперечным оребрением;
 в – поверхность с продольными ребрами

Для полуограниченной струи на поверхности с поперечным оребрением (рис. 3, б)

$$Re_0 = 1,43 \cdot 10^5, m_0 = 0,5$$

экспериментальные данные удовлетворяют выражению (2) только в струйной части в диапазоне (рис. 3, б, участок А).

$$\bar{y}_m < \bar{y} < \bar{y} \left(\frac{k}{U_\infty^2} \right)_{1\max}$$

$$\frac{\bar{u}'\bar{v}'}{U_\infty^2} = 0,571 \frac{k}{U_\infty^2} + 0,001.$$

Для струи на поверхности с продольным оребрением (рис. 3, в)

$$Re = 1,45 \cdot 10^5, m_0 = 0,525$$

экспериментальные данные частично удовлетворяют выражению (2) в диапазоне (рис. 3, в, участок А)

$$\bar{y}_m < \bar{y} < \bar{y} \left(\frac{k}{U_\infty^2} \right)_{1\min}$$

$$\frac{\bar{u}'\bar{v}'}{U_\infty^2} = 0,4 \frac{k}{U_\infty^2} + 0,001.$$

Свободный член в выражениях (5),(7),(8) в диапазоне

$$\bar{y}_m < \bar{y} < \bar{y} \left(\frac{k}{U_\infty^2} \right)_{1\max}$$

для полуограниченной струи на гладкой и шероховатых поверхностях один и тот же ($B=0,001$).

Зависимость турбулентной кинетической энергии от продольной пульсационной составляющей скорости \bar{u}' для полуограниченной струи на гладкой стенке при $x = 50$ мм, $U_0 = 42,5$ м/с, $U_H = 22,3$ м/с, $y_c = 7$ мм показана на рис. 5.

Линейная зависимость наблюдается только в диапазоне (рис. 5, участок А)

$$\bar{y} \left(\frac{k}{U_\infty^2} \right)_{1\max} < \bar{y} < \bar{y}_{\min}$$

$$\frac{\bar{u}'}{U_\infty}$$

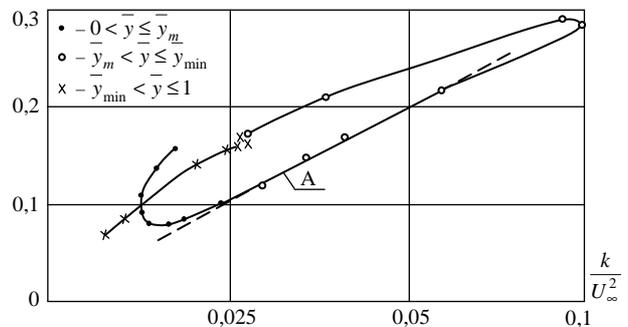


Рис. 5. Зависимость $\frac{\bar{u}'}{U_\infty} = f \left(\frac{k}{U_\infty^2} \right)$

$$\frac{\overline{u'v'}}{U_\infty^2} = 3,8 \frac{k}{U_\infty^2} + 0,001.$$

Зависимости турбулентного касательного напряжения от нормальной составляющей скорости $\overline{v'}$ для полуограниченной струи на гладкой и шероховатой стенках при $x = 50$ мм, $y_c = 7$ мм показаны на рис. 6.

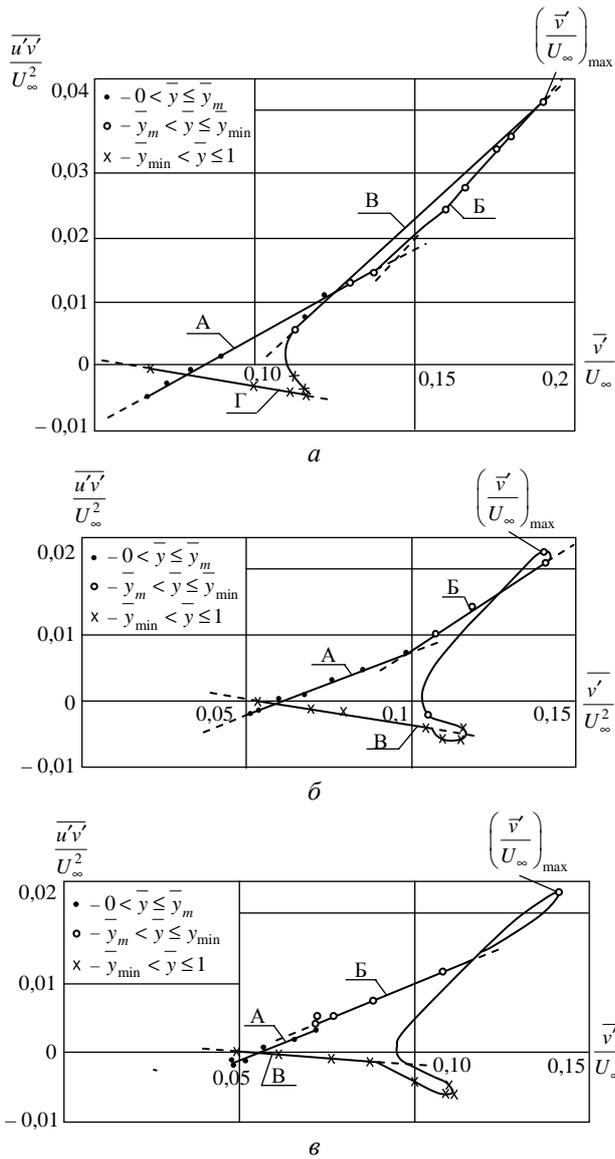


Рис. 6. Зависимость $\frac{\overline{u'v'}}{U_\infty^2} = f\left(\frac{\overline{v'}}{U_\infty}\right)$:

- а – гладкая стенка:
 $U_0 = 42,5$ м/с, $U_\Pi = 22,3$ м/с;
- б – стенка с поперечными ребрами:
 $U_0 = 41,9$ м/с, $U_\Pi = 21,5$ м/с;
- в – стенка с продольными ребрами:
 $U_0 = 42,5$ м/с, $U_\Pi = 22,3$ м/с

Экспериментальные данные в пристенной части полуограниченной струи $0 < \bar{y} < \bar{y}_m$ хорошо аппроксимируются

$$Re_0 = (1,43 - 1,45) \cdot 10^5, m_0 = 0,51 - 0,53$$

линейными зависимостями:

– для гладкой стенки участок А, (рис. 6, а):

$$\frac{\overline{u'v'}}{U_\infty^2} = 0,286 \left(\frac{\overline{v'}}{U_\infty}\right) - 0,0234;$$

– для поверхности с поперечными ребрами участок А (рис. 6, б):

$$\frac{\overline{u'v'}}{U_\infty^2} = 0,197 \left(\frac{\overline{v'}}{U_\infty}\right) - 0,011;$$

– для поверхности с продольными ребрами участок А (рис. 6, в):

$$\frac{\overline{u'v'}}{U_\infty^2} = 0,2 \left(\frac{\overline{v'}}{U_\infty}\right) - 0,012.$$

Для струйной и следной частей получены зависимости:

1) на гладкой стенке:

– участок Б (рис.6, а):

$$\frac{\overline{u'v'}}{U_\infty^2} = 0,55 \left(\frac{\overline{v'}}{U_\infty}\right) - 0,06;$$

$$\bar{y} \leq \bar{y}_{\min} < \bar{y} \left(\frac{\overline{v'}}{U_\infty}\right)_{1\max};$$

– участок В (рис. 6, а):

$$\frac{\overline{u'v'}}{U_\infty^2} = 0,44 \left(\frac{\overline{v'}}{U_\infty}\right) - 0,045;$$

$$\bar{y} \left(\frac{\overline{v'}}{U_\infty}\right)_{1\max} \leq \bar{y} < \bar{y}_{\min};$$

– участок Г (рис. 6, а):

$$\frac{\overline{u'v'}}{U_\infty^2} = -0,093 \left(\frac{\overline{v'}}{U_\infty}\right) + 0,006;$$

$$\bar{y} \left(\frac{\bar{v}'}{U_\infty^2} \right)_{2 \max} \leq \bar{y} \leq 1;$$

2) на поверхности с поперечными ребрами – участок B (рис. 6, в):

$$\frac{\bar{u}'\bar{v}'}{U_\infty^2} = 0,333 \left(\frac{\bar{v}'}{U_\infty^2} \right) - 0,025;$$

$$\bar{y}_m \leq \bar{y} < \bar{y} \left(\frac{\bar{v}'}{U_\infty^2} \right)_{1 \max};$$

– участок B (рис. 6, в):

$$\frac{\bar{u}'\bar{v}'}{U_\infty^2} = 0,082 \left(\frac{\bar{v}'}{U_\infty^2} \right) + 0,005;$$

$$\bar{y} \left(\frac{\bar{v}'}{U_\infty^2} \right)_{2 \max} \leq \bar{y} \leq 1;$$

3) на поверхности с продольными ребрами:

– участок B (рис. 6, в):

$$\frac{\bar{u}'\bar{v}'}{U_\infty^2} = 0,022 \left(\frac{\bar{v}'}{U_\infty^2} \right) - 0,01;$$

$$\bar{y}_m < \bar{y} < \bar{y} \left(\frac{\bar{v}'}{U_\infty^2} \right)_{1 \max};$$

– участок B (рис. 6, в):

$$\frac{\bar{u}'\bar{v}'}{U_\infty^2} = -0,025 \left(\frac{\bar{v}'}{U_\infty^2} \right) + 0,001;$$

$$\bar{y} \left(\frac{\bar{v}'}{U_\infty^2} \right)_{2 \max} \leq \bar{y} < 1,$$

где $\left(\frac{\bar{v}'}{U_\infty^2} \right)_{1 \max}$, $\left(\frac{\bar{v}'}{U_\infty^2} \right)_{2 \max}$ – точки первого и второго максимумов кривых зависимостей

$$\frac{\bar{v}'}{U_\infty^2} = f \left(\frac{y}{y_\infty} \right)$$

при перемещении от стенки в свободный поток (рис. 7).

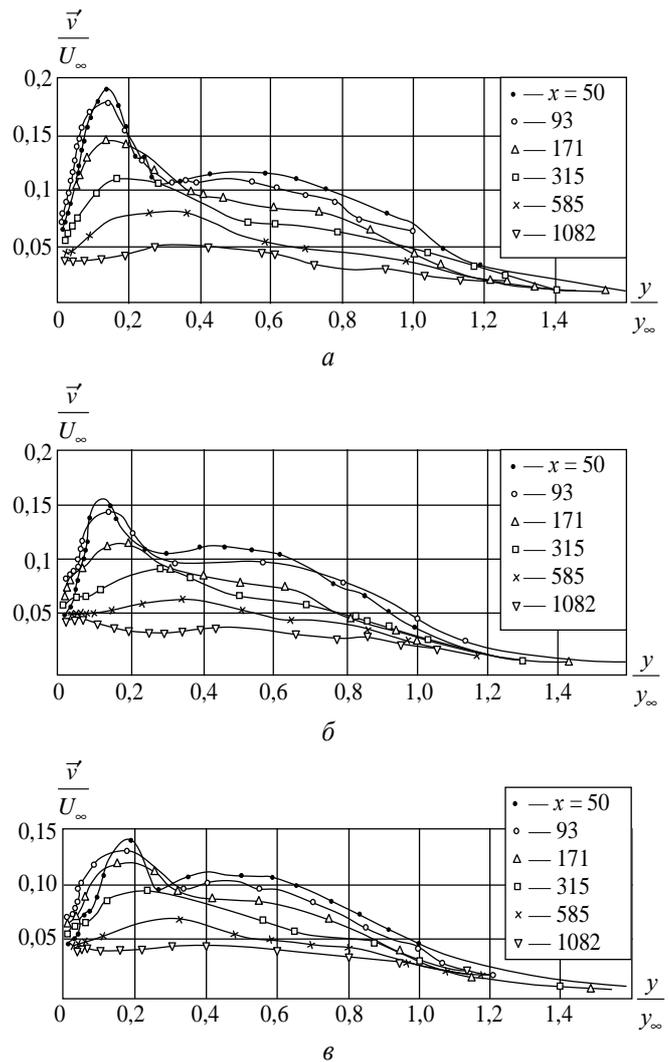


Рис. 7. Профили интенсивности поперечной пульсационной составляющей скорости: а – гладкая поверхность; б – поверхность с поперечным оребрением; в – поверхность с продольными ребрами

Выводы

1. Предположения Харша и Ли о линейной зависимости между турбулентным касательным напряжением и турбулентной кинетической энергией для полуограниченной струи выполнялись лишь частично. Такие зависимости получены для полуограниченной струи: на гладкой стенке – в пристенной, струйной и следной частях; для шероховатой поверхности – в струйной части струи.

2. Предложенное Алшамани равенство, описывающее связь между турбулентной кинетической энергией и продольными составляющими интенсивности турбулентности для полуограниченной струи, выполняется только на гладкой стенке в струйной части струи.

3. Установлено, что турбулентная кинетическая энергия и нормальные составляющие интенсивности турбулентности для полуограниченной струи хорошо описываются линейной зависимостью в пристенной, струйной и следной частях струи как на гладкой, так и на шероховатых поверхностях.

Полученный результат позволяет предложить линейную зависимость между турбулентной кинетической энергией и нормальными составляющими интенсивности турбулентности в качестве альтернативы равенству Алшамани, как более точную и универсальную.

Литература

1. Харша, Ли. Связь между турбулентным напряжением трения и кинетической энергией турбулентного движения / Харша, Ли // Ракетная техника и космонавтики. – 1970. – Т.8, №8. – С. 179–181.
2. Алшамани К.М.М. Полуэмпирические соотношения между турбулентными касательными напряжениями, кинетической энергией турбулентности и продольной составляющей интенсивности турбулентности / К.М.М. Алшамани // Ракетная техника и космонавтика. – 1978. – Т.16, №8. – С.145–147.
3. Бондарец А.А. Экспериментальная установка для исследования пристенных струй / А.А. Бондарец. – Деп. в ЦНТИГА, 27.10.87, №578 га 87. – 40 с.
4. Дыбан Е.П. Тепломассообмен и гидродинамика турбулизированных потоков / Е.П. Дыбан, Э.Я. Эпик. –К.: Наук. думка, 1985. –296 с.
5. Kacker S.C. Some properties of two dimensional turbulent wall jet in moving stream / S.C. Kacker, J.H. Whitelaw // J. of Applied Mech. – 1968. – Vol.35, № 4. – P.641–651.

Стаття надійшла до редакції 20.04.10.