

УДК 533.6.071.4:532.517.4

СОЧЕТАНИЕ ХОНЕЙКОМБА С СЕТКОЙ ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПОТОКА

Н. П. Михайлова, Е. У. Репик, Ю. П. Соседко

Проведено экспериментальное исследование эффективности подавления турбулентности потока в аэродинамических трубах с помощью хонейкомба в сочетании с детурбулизирующей сеткой. Установлено, что оптимальное расстояние между хонейкомбом и сеткой, при котором имеет место наибольшее подавление турбулентности, составляет 10–12 калибров ячейки хонейкомба. Выявлены условия, при которых наблюдается появление «стоячих волн» на участке между хонейкомбом и сеткой, что сопровождается «пением» потока в аэродинамической трубе.

1. Для увеличения эффективности подавления турбулентности набегающего потока в аэродинамических трубах часто используется набор из нескольких детурбулизирующих сеток [1]–[3]. Однако, как отмечается в [4]–[7], при одном и том же суммарном гидравлическом сопротивлении более эффективным является сочетание перфорированной решетки, или хонейкомба, с детурбулизирующей сеткой. Так, в [4], [5] рекомендуется использовать хонейкомб в сочетании с установленной вплотную к нему мелкой сеткой. Высокая эффективность сочетания хонейкомба с сеткой подтверждается опытными данными [7]. Однако в настоящее время нет ясности в вопросе об оптимальном месте расположения сетки относительно хонейкомба, что отмечается в дискуссии к работе [5].

В цели настоящей работы входило экспериментальное исследование влияния расстояния между хонейкомбом и детурбулизирующей сеткой на эффективность подавления турбулентности набегающего потока.

2. Опыты проводились в дозвуковой аэродинамической трубе при скорости набегающего потока $U_\infty \approx 7,5$ м/с. Схема установки детурбулизирующих устройств в канале трубы приведена на рис. 1. Высокий уровень турбулентности набегающего потока создавался искусственно с помощью генератора турбулентности (Γ), для чего использовалась крупноячеистая двухплоскостная сетка с размерами $M \times b = 23$ мм \times 6 мм, установленная на расстоянии $x_0 = 571$ мм вверх по потоку от

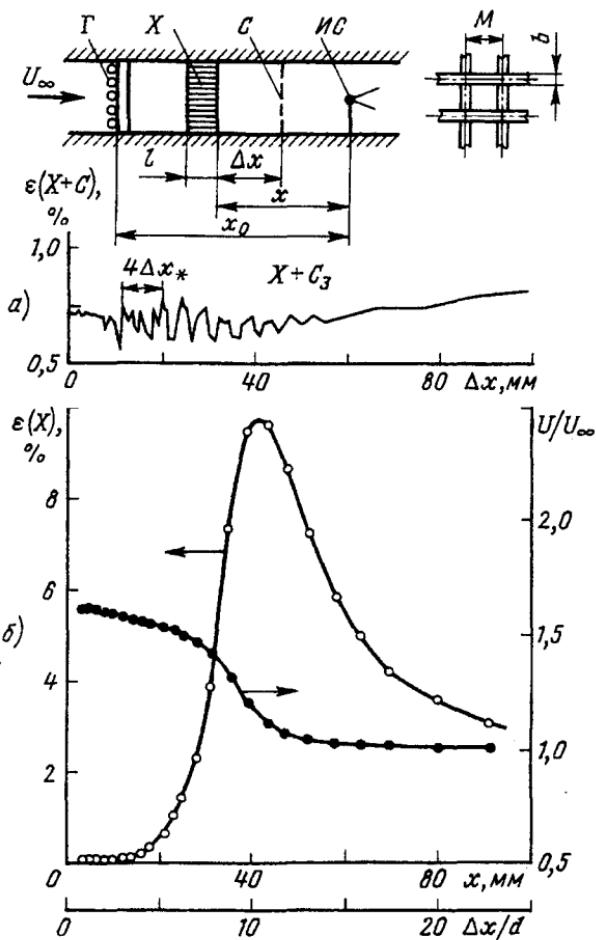


Рис. 1. а) влияние расстояния Δx между хонейкомбом и сеткой на интенсивность турбулентности $\varepsilon(X+C)$; б) изменение средней скорости и собственной турбулентности в ближнем следе за хонейкомбом

измерительного сечения (ИС). Исходный уровень турбулентности набегающего потока $\varepsilon_0 = \sqrt{\bar{u}^2} / U_\infty$ (относительная интенсивность продольной составляющей пульсаций скорости) регистрировался в измерительном сечении аэродинамической трубы и составлял 2,67%.

Исследования проводились с хонейкомбом (Х), изготовленным из плотно уложенных стальных трубок диаметром $d = 4$ мм с толщиной стенок $\delta = 0,1$ мм, длина которых была равна $l = 32$ мм ($l/d = 8$). Хонейкомб устанавливался между генератором турбулентности и измерительным сечением на расстоянии $x = 300$ мм вверх по потоку от измерительного сечения. Геометрические размеры хонейкомба и место его установки относительно измерительного сечения трубы выбирались в соответствии с рекомендациями работы [8], что обеспечивало наибольшую эффективность подавления турбулентности набегающего потока ε_0 в условиях работы хонейкомба без сетки. Степень турбулентности, регистрируемая в ИС трубы в следе за сочетанием генератора

турбулентности и хонейкомба, составляла $\varepsilon(\Gamma + X) = 1,64\%$ вместо $\varepsilon_0 = \varepsilon(\Gamma) = 2,67\%$ за одиночным генератором, при этом уровень собственной турбулентности, порождаемой хонейкомбом в бестурбулентном потоке, составлял $\varepsilon(X) = 1,28\%$.

В опытах были исследованы четыре мелкие плетеные сетки (С) разных геометрических размеров (см. таблицу) с разными коэффициентами заполнения $S = 1 - (1 - b/M)^2$. С помощью x -координатника сетки перемещались между хонейкомбом и измерительным сечением. Значения средней и пульсационной составляющих скорости измерялись с помощью термоанемометра постоянной температуры DISA 55A01.

Сетка	M , мм	b , мм	S	K
C_1	0,65	0,19	0,50	1,93
C_2	1,05	0,24	0,41	1,2
C_3	1,33	0,36	0,47	1,68
C_4	2,46	0,50	0,36	0,85

3. На первом этапе исследований определялся характер воздействия мелкой сетки на собственную турбулентность, порождаемую хонейкомбом в условиях бестурбулентного набегающего потока.

На рис. 1, а приведены результаты измерения интенсивности турбулентности ε на расстоянии $x = 300$ мм от хонейкомба при разных расстояниях Δx между хонейкомбом и детурбулизирующей сеткой C_3 (см. таблицу). Видно, что по мере удаления сетки от хонейкомба в диапазоне значений Δx от 0 до 50 мм наблюдаются изменения значений ε , близкие к периодическим. Отметим также, что при некоторых положениях сетки относительно хонейкомба в этом диапазоне значений Δx явно ощущается на слух «пение» потока на определенной фиксированной частоте.

На рис. 1, б приведено распределение средней и пульсационной составляющих скорости потока вдоль оси ячейки хонейкомба при отсутствии в потоке сетки. Из сопоставления рис. 1, а и б видно, что область резких периодических изменений ε за хонейкомбом, установленным в сочетании с сеткой, соответствует ближнему следу за одиночным хонейкомбом, где происходит уменьшение местной средней скорости потока от $U \approx 1,6U_\infty$ до его исходной величины перед хонейкомбом ($U/U_\infty = 1$). В этой же области наблюдается резкое возрастание пульсаций скорости ε до максимального значения $\varepsilon \approx 9,5\%$ с последующим плавным уменьшением величины ε .

В [8] показано, что в ближнем следе одиночного хонейкомба при $x/d \leq 10$ имеют место периодические по времени пульсации скорости, амплитуда которых нарастает по мере увеличения расстояния x/d . Это связано с началом перехода ламинарного течения в турбулентное, при этом положение максимума в распределении ε по x на рис. 1, б соответствует появлению пятен турбулентного течения в следе. Частота f

периодических пульсаций скорости в ближнем следе за хонейкомбом определяется геометрическими размерами хонейкомба и скоростью на-бегающего потока.

Если в качестве характерного размера хонейкомба вместо диаметра ячейки d принять диаметр прутка эквивалентной сетки b_{eq} , то число Струхalia Sh, рассчитанное по этому характерному размеру, принимает универсальное значение [8], такое же, как и при обтекании сеток или изолированного цилиндра:

$$Sh = \frac{fb_{eq}}{U_\infty} \approx 0,2 \div 0,25,$$

где

$$b_{eq} = \sqrt{\frac{\sqrt{3}}{2}} \left(1 - \sqrt{1 - S_{eq}}\right) d.$$

При этом значение S_{eq} для хонейкомбов произвольной геометрической формы может быть определено экспериментально с помощью соотношения

$$S_{eq} = 1 - U_\infty / U_1,$$

где U_1 — значение скорости в центре ячейки на выходе из хонейкомба при несомкнувшемся пограничном слое.

Из теории колебаний известно, что если периодическая волна распространяется между двумя отражающими стенками, то в том случае, когда расстояние между этими стенками кратно половине длины волны колебаний, возникает «стоячая волна», которая характеризуется удвоением амплитуды колебаний в узловых точках, отстоящих друг от друга на расстояниях Δx_* , равных длине полуволны колебаний:

$$\Delta x_* = \frac{1}{2} \lambda, \quad \lambda = U / f,$$

где f — частота колебаний.

Таким образом, можно полагать, что при перемещении сетки в ближнем следе за хонейкомбом (где наблюдаются периодические пульсации скорости) «стоячие волны» будут возникать именно в тех случаях, когда расстояние между хонейкомбом и сеткой будет

$$\Delta x = n \Delta x_* = \frac{1}{2} n \lambda, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Максимальные значения ε , наблюдаемые на рис. 1, a, соответствуют появлению «стоячих волн», что сопровождается «пением» потока вследствие усиления амплитуды периодических пульсаций скорости.

Из рис. 1, a следует, что в среднем величина расстояния Δx_* между соседними максимумами $\varepsilon(X + C)$ при расположении сетки вблизи

хонейкомба ($\Delta x/d \approx 3 - 5$) составляет около 2,1 мм. Это хорошо согласуется с расчетной оценкой величины $\Delta x_* = \lambda/2 = U_1/2f$, если использовать результаты измерений частоты f периодических пульсаций скорости, полученные для этого же хонейкомба при той же скорости набегающего потока [8]: $f = 2400$ Гц; $U_\infty = 7,5$ м/с; $U_1 = 1,5U_\infty$ (рис. 1, б). Действительно, в этом случае расчет дает $\Delta x_* = U_1/2f \approx 2,3$ мм, что близко к измеренному значению $\Delta x_{\text{ср}}$.

На рис. 2 приведены результаты измерений величины $\varepsilon(X+C)$ в зависимости от Δx для хонейкомба в сочетании с каждой из четырех исследованных детурбулизирующих сеток (см. таблицу) при одном и том же значении скорости набегающего потока $U_\infty = 7,5$ м/с. Видно, что характер периодических изменений величины $\varepsilon(X+C)$ и протяженность области этих изменений ($\Delta x \approx 50$ мм) практически одинаковы для всех сеток. Это подтверждает высказанное выше предположение о том, что механизм периодических изменений $\varepsilon(X+C)$ определяется только характером течения в ближнем следе за хонейкомбом и расстоянием Δx независимо от геометрических параметров используемой сетки. Подтверждением этого являются также приведенные на рис. 3 результаты измерений величины $\varepsilon(X+C)$ за хонейкомбом в сочетании с сеткой C_2 при разных значениях скорости набегающего потока ($U_\infty = 5 - 13$ м/с). Видно, что по мере увеличения скорости U_∞ область резких периодических изменений величины $\varepsilon(X+C)$ заметно сокращается, что, по-видимому, согласуется с уменьшением в этих условиях протяженности области перехода ламинарного течения в турбулентное в ближнем следе за хонейкомбом [8]. Отметим, что в среднем характер изменения величины $\varepsilon(X+C)$ в зависимости от Δx в большей мере определяется поведением величины собственной турбулентности $\varepsilon(C)$, порождаемой одиночной сеткой, установленной в бестурбулентном потоке (см. рис. 3).

4. Выше было рассмотрено взаимодействие детурбулизирующей сетки с турбулентностью, порождаемой хонейкомбом в условиях бестурбулентного набегающего потока ($\varepsilon_0 \approx 0$). Рассмотрим теперь случай, когда хонейкомб в сочетании с сеткой используется для подавления высокого уровня турбулентности набегающего потока $\varepsilon_0 = \varepsilon(\Gamma)$.

Измерения проводились при заданном уровне турбулентности набегающего потока $\varepsilon(\Gamma) = 2,67\%$, создаваемой искусственно путем установки генератора турбулентности на расстоянии $x_0 = 571$ мм вверх по потоку от измерительного сечения. Хонейкомб был установлен в фиксированном положении между генератором и измерительным сечением на расстоянии $x = 300$ мм вверх по потоку от ИС, при котором имеет место наибольшее подавление турбулентности набегающего потока ($\varepsilon(\Gamma + X) = 1,64\%$). Исследовалось влияние расстояния Δx между хонейкомбом и сеткой на уровень турбулентности $\varepsilon(\Gamma + X + C)$, регистрируемый в измерительном сечении.

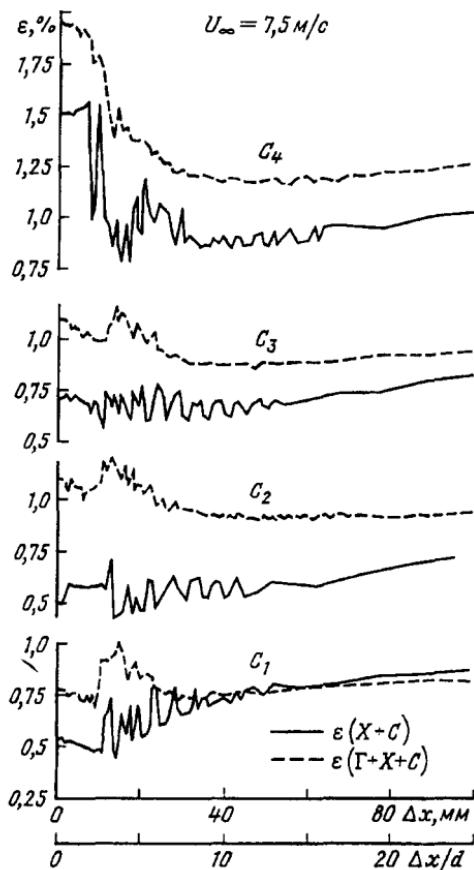


Рис. 2. Интенсивность турбулентности за хонейкомбом и сеткой в зависимости от расстояния Δx между ними в набегающем бестурбулентном ($\epsilon(X+C)$) и турбулизированном ($\epsilon(\Gamma+X+C)$) потоке для разных сеток

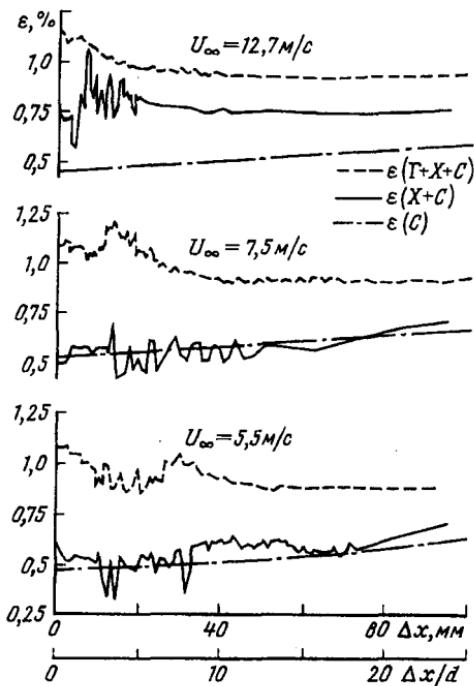


Рис. 3. Интенсивность турбулентности в зависимости от расстояния Δx между хонейкомбом и сеткой в набегающем бестурбулентном ($\epsilon(C)$ и $\epsilon(X+C)$) и турбулизированном ($\epsilon(\Gamma+X+C)$) потоке для разных значений скорости потока

На рис. 2 приведены опытные значения $\epsilon(\Gamma+X+C)$ при $U_\infty = 7,5 \text{ м/с}$ совместно с соответствующими значениями $\epsilon(X+C)$, полученными в потоке без генератора турбулентности, в зависимости от расстояния Δx для сеток с разными геометрическими размерами (см. таблицу). Анализ этих данных показывает, что в условиях высокотурбулизированного набегающего потока установка детурбулизирующей мелкой сетки в ближнем следе за хонейкомбом при $\Delta x/d < 10$ в общем случае является менее эффективной, чем при $\Delta x/d \approx 10 - 12$. Это находится в противоречии с рекомендациями [4], [5], где предлагается устанавливать сетку сразу же за хонейкомбом ($\Delta x = 0$).

Этот вывод остается справедливым при всех исследованных скоростях набегающего потока U_∞ . На рис. 3 приведено сравнение измеренных значений $\epsilon(\Gamma+X+C)$ и $\epsilon(X+C)$ в функции от Δx для детурбулизирующей сетки C_2 в диапазоне значений U_∞ от 5,3 до 13,3 м/с.

Для количественной оценки эффективности подавления турбулентности набегающего потока с помощью сочетания хонейкомба с

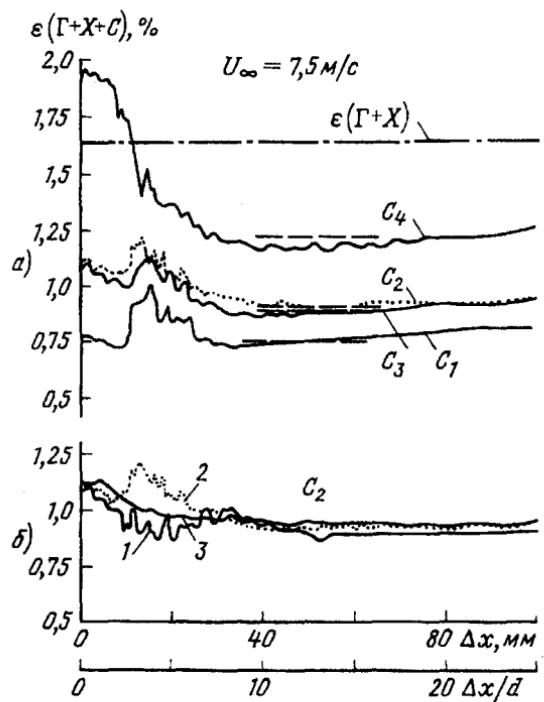


Рис. 4. Эффективность подавления турбулентности набегающего потока $\epsilon(\Gamma + X + C)$ в зависимости от расстояния Δx между хонейкомбом и сеткой: а) влияние геометрических размеров детурбулизирующей сетки; б) влияние скорости набегающего потока:

1 — $U_\infty = 5.5 \text{ м/с}$; 2 — 7.5 м/с ; 3 — 12.7 м/с

расстояние Δx_{opt} между хонейкомбом и сеткой, при котором достигается условие $\epsilon(\Gamma + X + C) = \min$, приблизительно равно $\Delta x_{\text{opt}}/d \approx 10-12$.

Что же касается эффективности использования детурбулизирующих сеток разных геометрических размеров, то, как видно из рис. 4, а, величина отношения $\epsilon(\Gamma + X + C)/\epsilon(\Gamma + X)$ зависит как от гидравлического сопротивления сетки, так и от размеров ячейки, т. е. в общем случае от собственной турбулентности $\epsilon(C)$, порождаемой этой сеткой.

Для оценки эффективности детурбулизирующей сетки, используемой в сочетании с хонейкомбом для подавления высокого уровня турбулентности набегающего потока, можно применять соотношение, полученное ранее в [9] для определения эффективности одиночной детурбулизирующей сетки в условиях высокого уровня турбулентности набегающего потока $\epsilon(\Gamma)$:

$$\frac{\epsilon(\Gamma + C)}{\epsilon(\Gamma)} = \sqrt{\frac{1 + 3[\epsilon(C)/\epsilon(\Gamma)]^2}{1 + K}}. \quad (1)$$

ссткой сопоставим результаты, полученные при использовании разных детурбулизирующих сеток в сочетании с одним и тем же хонейкомбом. На рис. 4, а представлено сравнение значений $\epsilon(\Gamma + X + C)$ для разных сеток в зависимости от расстояния Δx при постоянной скорости набегающего потока $U_\infty = 7.5 \text{ м/с}$. Здесь же показан исходный уровень турбулентности $\epsilon(\Gamma + X)$, соответствующий условиям давления турбулентности потока хонейкомбом при отсутствии детурбулизирующей сетки. Влияние скорости потока на зависимость $\epsilon(\Gamma + X + C)$ от расстояния Δx для сетки C_2 показано на рис. 4, б.

Из анализа результатов, приведенных на рис. 4, следует, что при использовании сочетания хонейкомба с сеткой для подавления высокого уровня турбулентности набегающего потока оптимальное

Здесь $K = 2\Delta p/\rho U_\infty^2$ — коэффициент гидравлического сопротивления сетки, $\varepsilon(C)$ — интенсивность собственной турбулентности, порождаемой сеткой в бестурбулентном потоке.

Анализ показал, что соотношение (1) можно использовать и для сочетания хонейкомб — сетка, если в качестве турбулентности набегающего потока вместо $\varepsilon(\Gamma)$ принять уровень турбулентности, регистрируемый в измерительном сечении за генератором турбулентности и хонейкомбом, $\varepsilon(\Gamma + X)$. В этих условиях соотношение (1) примет вид:

$$\frac{\varepsilon(\Gamma + X + C)}{\varepsilon(\Gamma + X)} = \sqrt{\frac{1 + 3[\varepsilon(C)/\varepsilon(\Gamma + X)]^2}{1 + K}}. \quad (2)$$

Здесь величина собственной турбулентности сетки $\varepsilon(C)$ может быть рассчитана по формуле [9]:

$$\frac{\varepsilon(C)}{\sqrt{S}} = 41 \left(\frac{x_C}{M} \right)^{-0.7} \text{ при } x_C / M \geq 20, \quad (3)$$

где $S = 1 - (1 - b/M)^2$ — коэффициент заполнения сетки, M и b — соответственно размер ячейки и диаметр прутка сетки, $x_C = x - \Delta x$ — расстояние от сетки до измерительного сечения ИС (см. рис. 1).

Результаты оценки величины $\varepsilon(\Gamma + X + C)$ по формулам (2), (3) для всех четырех исследованных детурбулизирующих сеток приведены на рис. 4, а (см. пунктирные линии в окрестности значений $\Delta x = 50$ мм). Расчеты проводились при $\varepsilon(\Gamma + X) = 1,64\%$; $\Delta x = 50$ мм ($x_C = 250$ мм), при этом использовались значения геометрических параметров сеток, приведенные в таблице. Видно, что рассчитанные и опытные значения $\varepsilon(\Gamma + X + C)$ хорошо согласуются между собой.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, код проекта 96-01-01257.

ЛИТЕРАТУРА

1. Dryden H. L., Schubauer G. B. The use of damping screens for the reduction of wind-tunnel turbulence//J. Aeron. Sci.—1947. Vol. 14, N 4.
2. Groth J., Johansson A. V. Turbulence reduction by screens//J. Fluid Mech.—1988. Vol. 197.
3. Дербунович Г. И., Земская А. С., Репик Е. У., Соседко Ю. П. Оптимальные условия детурбулизации потока с помощью набора сеток//Изв. АН СССР, МЖГ.—1993. № 1.
4. Loehrke R. I., Nagib H. M. Experiments on management of free-stream turbulence//AGARD Rep.—1972, N 598.
5. Loehrke R. I., Nagib H. M. Control of free-stream turbulence by means of honeycombs: a balance between suppression and generation//Trans. ASME, J. Fluid Engng.—1976. Vol. 98, N 3.
6. Tan-Aitchat J., Nagib H. M., Loehrke R. I. Interaction of free-stream turbulence with screens and grids: a balance between turbulence scales//J. Fluid Mech.—1982. Vol. 114.

7. Scheiman J., Brooks J. D. Comparison of experimental and theoretical turbulence reduction from screens, honeycombs and honeycomb-screen combinations//J. Aircraft.— 1981. Vol. 18, № 8.

8. Михайлова Н. П., Репик Е. У., Соседко Ю. П. Оптимальные условия управления интенсивностью турбулентности потока с помощью хонейкомбов//Изв. РАН, МЖГ.— 1994, № 3.

9. Дербунович Г. И., Земская А. С., Репик Е. У., Соседко Ю. П. Использование сеток для управления структурой турбулентного потока в аэродинамических трубах//Ученые записки ЦАГИ.— 1982. Т. XIII, № 1.

Рукопись поступила 3/XI 1996 г.