

УДК 533.6.071:532.517.4

© 1993 г. Г. И. ДЕРБУНОВИЧ, А. С. ЗЕМСКАЯ,
Е. У. РЕПИК, Ю. П. СОСЕДКО

ОПТИМАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ ДЕТУРБУЛИЗАЦИИ ПОТОКА С ПОМОЩЬЮ НАБОРА СЕТОК

Для уменьшения уровня турбулентности набегающего потока в дозвуковых аэродинамических трубах широко применяются наборы детурбулизирующих (гасящих) сеток, устанавливаемых в форкамере аэродинамической трубы [1—4]. Однако в литературе до сих пор отсутствуют рекомендации по оптимальному выбору количества гасящих сеток, их геометрических размеров и расстояния между сетками в наборе. Это обусловлено прежде всего сложностью рассматриваемой задачи, степень неопределенности которой резко возрастает с увеличением количества гасящих сеток.

В данной работе приведены результаты экспериментального исследования условий подавления турбулентности потока с помощью набора гасящих сеток, каждая из которых работает в оптимальном режиме. Даны рекомендации по выбору количества гасящих сеток в наборе, их геометрических параметров и места их установки в потоке, обеспечивающих наиболее эффективное подавление турбулентности набегающего потока.

1. Согласно существующим взглядам, сетка не только подавляет турбулентность набегающего потока ϵ_0 , но и одновременно порождает свою собственную (сеточную) турбулентность ϵ_s . Гасящее действие сетки основано главным образом на изменении масштаба турбулентных пульсаций скорости, что приводит к более быстрому их затуханию по сравнению с крупномасштабной турбулентностью. Порождение собственной турбулентности связано с образованием вихрей при прохождении потока через сетку.

Экспериментальные исследования [4] позволили установить весьма важный результат, который состоит в том, что для любой гасящей сетки с заданными размерами ячейки M и диаметра прутка d существует оптимальное расстояние x_* от сетки до измерительного сечения в рабочей части трубы, при котором подавление турбулентности набегающего потока наибольшее, т. е. коэффициент уменьшения интенсивности турбулентности $\epsilon' = \epsilon/\epsilon_0$ минимален. Здесь $\epsilon = \sqrt{\langle u^2 \rangle} / U_\infty$ — интенсивность турбулентности потока за гасящей сеткой, регистрируемая в измерительном сечении. Смещение гасящей сетки как в одну, так и в другую сторону относительно положения x_* приводит к увеличению интенсивности турбулентности в измерительном сечении трубы.

Каждому оптимальному месту установки гасящей сетки соответствует оптимальное значение собственной сеточной турбулентности ϵ_s , поскольку величины ϵ_s и x однозначно связаны между собой. Как показано в [5]

$$\frac{\epsilon_s}{\sqrt{S}} = \begin{cases} A_1 \left(\frac{x}{M} \right)^{-0,95} & , \quad 7 < \frac{x}{M} < 20 \\ A_2 \left(\frac{x}{M} \right)^{-0,7} & , \quad \frac{x}{M} \geq 20 \end{cases} \quad (1.1)$$

$$S = 1 - \left(1 - \frac{d}{M} \right)^2$$

Здесь $A_1 = 0,76$, $A_2 = 0,36$ для двухплоскостных сеток; $A_1 = 0,81$, $A_2 = 0,41$ для плетеных сеток; S — коэффициент заполнения сетки.

Фигура 1 иллюстрирует зависимость коэффициента уменьшения турбулентности $\epsilon' = \epsilon/\epsilon_0$ (с учетом коэффициента сопротивления сетки $K = 2\Delta p/\rho U_\infty^2$) от $\epsilon'_s = \epsilon_s/\epsilon_0$ для трех одиночных гасящих сеток с заметно различающимися геометрическими размерами. Точки 1—3 относятся к гасящим сеткам с размерами ячеек и прутков соответственно $M \times d = 8 \times 2$, 4×1 и $1,05 \times 0,24$ мм. Видно, что каждой сетке соответствует свое оптимальное значение ϵ_{s*}' , при котором величина $\epsilon' \sqrt{1 + K}$ минимальна. Обработка многочисленных опытных данных показала, что минимальное значение $\epsilon' = \epsilon_{*}'$ при $\epsilon_s' = \epsilon_{s*}'$ может быть определено с помощью эмпирического соотношения [4]

$$\epsilon_{*}' \sqrt{1 + K} = \sqrt{0,6 + 1,6\epsilon_{s*}'^2} \quad (1.2)$$

Отметим, что в опытах [4], так же как и в настоящем исследовании, испытывались сетки с коэффициентом заполнения $S = 0,4 \pm 0,05$, т. е. сетки с постоянным отношением $M/d \approx 4-5$ и сравнительно малым коэффициентом гидравлического сопротивления $K \approx 1$, поскольку в [4, 5] показано, что использование таких сеток в аэродинамических трубах наиболее эффективно. В этом случае сетку можно охарактеризовать только размером ячейки M .

Повышенный уровень турбулентности набегающего потока ϵ_0 в опытах создавался с помощью крупноячейистой сетки (генератора турбулентности) с размерами ячейки M_0 , установленной на расстоянии x_0 вверх по потоку от измерительного сечения. На фиг. 1 приведена схема относительного расположения генератора турбулентности 4, гасящей сетки 5 и измерительного сечения 6.

Использование понятия «генератор турбулентности» весьма удобно и в том случае, когда высокий уровень турбулентности набегающего потока не создается специально, а обусловлен реальными условиями течения в аэродинамической трубе. В этом случае уровень реальной турбулентности набегающего потока в аэродинамической трубе, обусловленный возможными источниками вихревых возмущений в трубе, можно представить как турбулентности, порождаемую некоторым условным генератором турбулентности, установленным в заданном сечении трубы. Его геометрические размеры M_0 , d_0 и место расположения в аэродинамической трубе, т. е. расстояние x_0 от измерительного сечения в рабочей части трубы до генератора, могут быть рассчитаны по измеренным значениям ϵ_0 и $d\epsilon_0/dx$ в окрестности измерительного сечения. В соответствии с законом вырождения сеточной турбулентности (1.1) при $x/M > 20$ и $S_0 = 0,4$ имеем

$$x_0 = 0,7\epsilon_0 / (d\epsilon_0/dx), \quad M_0 = 8x_0\epsilon_0^{10/7}$$

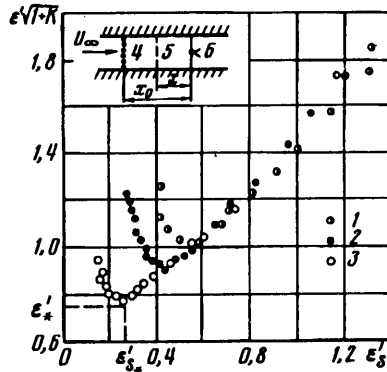
На фиг. 2 приведены результаты опытов [4] по определению связи между относительным размером ячейки гасящей сетки $M' = M/M_0$ и оптимальным расстоянием $x_{*}' = x_*/x_0$ от сетки до измерительного сечения, которые могут быть аппроксимированы эмпирической зависимостью

$$x_{*}' = 0,89\sqrt{M'} + 0,18 \quad (1.3)$$

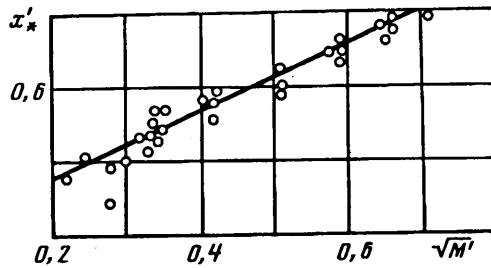
Поскольку оптимальные значения ϵ_{s*}' и x_{*}' взаимосвязаны и зависимость между ними можно выразить простой эмпирической формулой [4]

$$\epsilon_{s*}' = x_{*}' - 0,14 \quad (1.4)$$

соотношение (1.2) можно представить в форме, более удобной для практического использования



Фиг. 1



Фиг. 2

$$\varepsilon_*' \sqrt{1+K} = \sqrt{0,6 + 1,6 (x_*' - 0,14)^2} \quad (1.5)$$

или в рассматриваемом случае $K=1$

$$\varepsilon_*' = \sqrt{0,3 + 0,8 (x_*' - 0,14)^2}$$

Таким образом, приведенные выше соотношения позволяют определить место оптимального расположения одиночной гасящей сетки с заданными размерами ячейки, способной наиболее эффективно снижать уровень турбулентности набегающего потока при относительно небольшом гидродинамическом сопротивлении ($K \approx 1$). Можно предположить, что и в случае нескольких гасящих сеток (при последовательном составлении набора сеток) для каждой новой сетки в наборе должно существовать оптимальное место ее расположения, при котором ее эффективность максимальна. Настоящие опыты подтвердили это предположение. При этом все, что расположено вверх по потоку от последней рассматриваемой гасящей сетки (т.е. предыдущие гасящие сетки, включая генератор турбулентности), можно рассматривать как один эквивалентный генератор турбулентности с параметрами $M_{0_{\text{eq}}}$ и $x_{0_{\text{eq}}}$, создающий ту реальную турбулентность потока, в которую помещают эту последнюю гасящую сетку.

Таким образом, задачу для каждой последовательно установленной в наборе гасящей сетки можно свести к уже исследованному варианту для генератора турбулентности и одиночной гасящей сетки. Для решения этой задачи необходимо, во-первых, сформулировать общие правила определения значений $x_{0_{\text{eq}}}$ и $M_{0_{\text{eq}}}$, характеризующих эквивалентный генератор турбулентности для каждой последующей гасящей сетки в наборе, и, во-вторых, экспериментально установить возможность использования соотношений (1.2)—(1.4), полученных в [4] для одиночных гасящих сеток, в случае набора гасящих сеток, каждая из которых работает в оптимальных условиях.

Дело в том, что соотношения (1.2)—(1.4), строго говоря, нельзя прямо

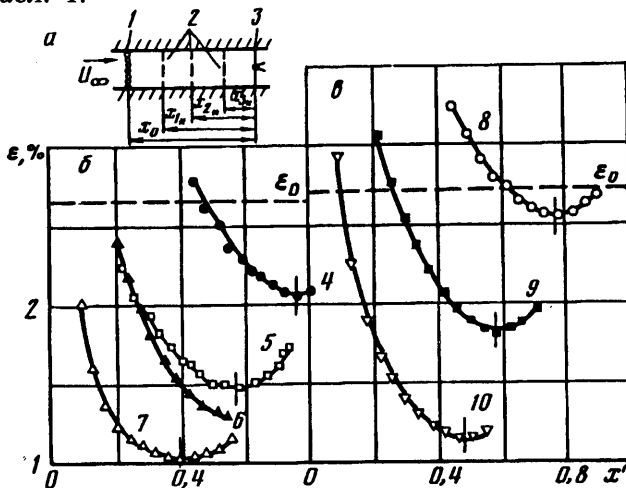
Таблица 1

Генераторы турбулентности и сетки	M , мм	d , мм	S	K
Г1	23	6	0,45	1,0
Г2	12	3	0,44	0,92
С1	10	2,5	0,44	0,76
С2	6	1,5	0,44	0,81
С3	4	1,0	0,44	1,03
С4	2,65	0,58	0,39	1,0
С5	2,46	0,50	0,36	0,85
С6	1,40	0,31	0,39	1,24
С7	1,21	0,24	0,35	1,01
С8	1,05	0,24	0,41	1,2

перенести на условия работы набора гасящих сеток, поскольку они получены с использованием неявного предположения о том, что в них интегральным образом учитываются законы вырождения турбулентности $\varepsilon_0(x)$ и $\varepsilon_s(x)$. Однако если для величин $\varepsilon_0(x)$ и $\varepsilon_s(x)$ известно, что они вырождаются в соответствии с законом (1.1), то закон вырождения величины $\varepsilon(x)$, являющейся исходной ($\varepsilon_{0_{eq}}$) для следующей гасящей сетки, в общем случае будет отличаться от зависимости (1.1).

2. Ниже приводятся результаты экспериментальных исследований, на основе которых предложена методика составления оптимального набора из нескольких гасящих сеток, позволяющего наиболее эффективно снижать уровень турбулентности набегающего потока в аэродинамических трубах. Ввиду большого числа параметров, влияющих на эффективность гашения турбулентности с помощью сеток, задача решалась для частного случая, когда каждая из сеток набора работает в оптимальных условиях.

Опыты проводились при скорости набегающего потока $U_\infty = 7,5$ м/с. Измерения средних значений и пульсаций скорости осуществлялись с помощью термоанемометрической аппаратуры DISA 55A01. Основные параметры исследуемых генераторов турбулентности (Г1, Г2), и гасящих сеток (С1—С8) приведены в табл. 1.



Фиг. 3

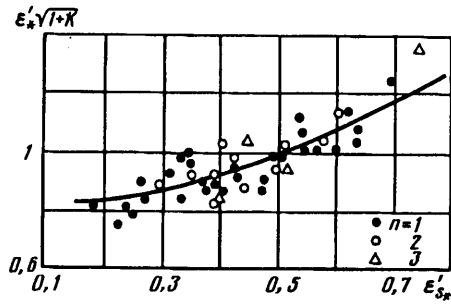
Таблица 2

№ п.п.	Сочетание генератора и сеток	$\epsilon_{0\text{сг}}$, %	$\epsilon_{\text{сг}}$, %	x_*/x_0	ϵ_* , %
$x_0 = 566$ мм					
1	Г1 + С1	2,67	1,68	0,781	2,07
	Г1 + С1 + С3	2,07	1,05	0,565	1,48
	Г1 + С1 + С8	2,07	0,61	0,399	1,23
	Г1 + С1 + С3 + С3	1,48	1,09	0,519	1,40
	Г1 + С1 + С3 + С6	1,48	0,66	0,405	1,03
	Г1 + С1 + С3 + С8	1,48	0,58	0,420	0,96
2	Г1 + С3	2,67	1,04	0,580	1,65
	Г1 + С3 + С6	1,65	0,66	0,410	1,12
3	Г1 + С5	2,67	0,91	0,428	1,93
	Г1 + С5 + С6	1,93	0,74	0,336	1,18
	Г1 + С5 + С8	1,93	0,67	0,346	1,20
$x_0 = 266$ мм					
4	Г2 + С3	2,72	1,45	0,692	2,14
	Г2 + С3 + С7	2,14	0,91	0,485	1,46
	Г2 + С3 + С8	2,14	0,94	0,485	1,26
5	Г2 + С2	2,72	1,89	0,778	2,52
	Г2 + С2 + С3	2,52	1,53	0,647	2,00
	Г2 + С2 + С4	2,52	1,41	0,590	1,82
	Г2 + С2 + С5	2,52	1,24	0,556	1,73
	Г2 + С2 + С7	2,52	0,94	0,459	1,58
	Г2 + С2 + С8	2,52	0,98	0,459	1,40
	Г2 + С2 + С4 + С7	1,82	0,90	0,489	1,22
	Г2 + С2 + С4 + С8	1,82	0,94	0,489	1,15

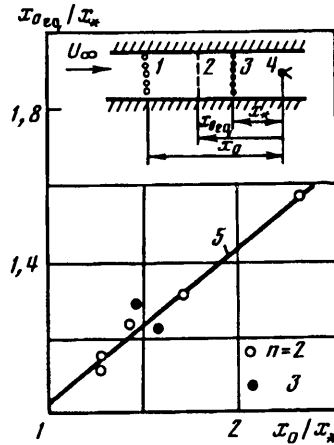
Все измерения проводились при равномерном распределении средней и пульсационной скорости за сетками. Как показано в [5], распределение ϵ и средней скорости U по сечению канала становится практически равномерным уже при $x/M > 7$, при этом среднеквадратичные значения отклонений σ_U/U и σ_ϵ/ϵ для сеток с коэффициентом заполнения $0,23 < S < 0,61$ в среднем равны 3 и 5% соответственно.

Набор гасящих сеток состоял из n сеток с заранее выбранными размерами ячеек M_1, M_2, \dots, M_n (фиг. 3, а). Первая гасящая сетка 2 с размером ячейки M_1 устанавливалась на специальном X-координатнике и путем перемещения ее вдоль оси рабочей части аэродинамической трубы на участке от измерительного сечения 3 ($x=0$) до $x=x_0$ (где был установлен генератор турбулентности 1) определялось ее оптимальное положение x_{1*} , при котором суммарная турбулентность ϵ_* за генератором турбулентности и гасящей сеткой была минимальной. Эта гасящая сетка закреплялась в положении $x=x_{1*}$ и затем аналогичная процедура проделывалась со второй гасящей сеткой, с размером ячейки M_2 , но уже в диапазоне значений x от 0 до x_{1*} , в результате чего определялось оптимальное положение x_{2*} второй гасящей сетки. Таким же образом определялось оптимальное положение всех остальных гасящих сеток данного набора (оптимальные положения x_* на всех кривых фиг. 3 помечены вертикальной чертой).

В результате находилась такая расстановка всех гасящих сеток в каждом из



Фиг. 4



Фиг. 5

исследованных наборов, которая обеспечивала максимальное подавление турбулентности набегающего потока.

3. Результаты экспериментального определения оптимальной расстановки гасящих сеток для всех исследованных наборов с разным количеством сеток ($n=1, 2$ и 3) приведены в табл. 2.

Значения $\epsilon_{0_{c,q}}, \epsilon_{s_*}', x_*'$ и ϵ_* относятся к последней сетке набора.

В качестве иллюстрации на фиг. 3 приведены результаты определения оптимального положения трех гасящих сеток при использовании двух разных генераторов турбулентности Г1 (фиг. 3, б) и Г2 (фиг. 3, в). Исследованы следующие сочетания генераторов турбулентности и гасящих сеток: 4 — Г1 + С1, 5 — Г1 + С1 + С3, 6 — Г1 + С1 + С3 + С4, 7 — Г1 + С1 + С3 + С6, 8 — Г2 + С2, 9 — Г2 + С2 + С3, 10 — Г2 + С2 + С3 + С8. Оптимальным считалось то положение x_0 гасящей сетки, при котором уровень турбулентности, регистрируемый в измерительном сечении, был минимальным ($\epsilon = \epsilon_*$).

Следует отметить, что минимальное значение ϵ_* достигается не всегда. В некоторых случаях, когда ячейки последующей гасящей сетки соизмеримы с ячейками предыдущей гасящей сетки, величина ϵ за последней гасящей сеткой не достигает своего минимума, а монотонно убывает по мере увеличения x вплоть до максимально возможных значений x , при которых исследуемая гасящая сетка вплотную приближается к предыдущей сетке (кривая б на фиг. 3, б). В таких случаях сетка исключалась из рассмотрения как неудовлетворяющая условиям оптимального гашения турбулентности.

Отметим, что предложенное ранее для одиночной гасящей сетки соотношение

(1.2) выполняется и для нескольких гасящих сеток ($n > 1$), если они работают в оптимальных условиях. Это видно из фиг. 4, где приведены экспериментальные значения $(\epsilon_* / \epsilon_0) \sqrt{1 + K}$ в зависимости от $\epsilon_{*n} / \epsilon_0$ для $n = 1, 2$ и 3 в условиях оптимальной работы гасящих сеток. Кривая рассчитана по формуле (1.2) для $n = 1$. При $n > 1$ в качестве величины ϵ_* принималось значение ϵ_{n*} , измеренное за оптимально установленной n -й гасящей сеткой, в качестве ϵ_{*n} — значение ее собственной турбулентности $(\epsilon_{*n})_n$, а в качестве ϵ_0 — интенсивность турбулентности $\epsilon_{(n-1)*}$, измеренная за предыдущей $(n - 1)$ -й гасящей сеткой набора.

С учетом этого дальнейший анализ опытных данных (приведенных выше) проводился в предположении, что при $n > 1$ справедливо не только соотношение (1.2), но и соотношение (1.4), полученное для случая одиночной гасящей сетки.

Поясним схему анализа для случая двух гасящих сеток в наборе ($n = 2$). Если генератор турбулентности и первая гасящая сетка остаются неизменными, то каждому выбранному размеру второй гасящей сетки M_2 соответствуют свое оптимальное положение x_{2*} и своя величина $(\epsilon_{*2})_2$. Пользуясь только этими опытными значениями, а также величиной $\epsilon_{0_{\text{сг}}}$ (которая равна результирующей величине ϵ_{1*} за генератором и первой гасящей сеткой), можно с помощью соотношения (1.4) определить для каждого варианта установки второй гасящей сетки свое индивидуальное положение $x_{0_{\text{сг}}}$ эквивалентного генератора турбулентности

$$x_{0_{\text{сг}}} = \frac{x_{2*}}{(\epsilon_{*2})_2 / \epsilon_{1*} + 0,14} \quad (3.1)$$

Из физических соображений очевидно, что характеристики этого эквивалентного генератора, заменяющего набор из действительного генератора и первой гасящей сетки, не должны зависеть от размеров и места расположения второй гасящей сетки. Поэтому в настоящем анализе значения $x_{0_{\text{сг}}}$, полученные из соотношения (3.1) для разных вариантов установки второй гасящей сетки, осреднялись, после чего определялась зависимость этого осредненного значения $x_{0_{\text{сг}}}$ от исходного положения x_0 действительного генератора и положения x_{1*} первой гасящей сетки. Подобные рассуждения справедливы также для случая большего количества гасящих сеток ($n = 3$ и т. д.).

Таким образом, определение эквивалентного генератора турбулентности в итоге сводится к следующей задаче: имеется генератор турбулентности на расстоянии x_0 вверх по потоку от измерительного сечения и гасящая сетка в оптимальном положении x_* , уменьшающая исходный уровень турбулентности ϵ_0 до величины ϵ_* . Нужно найти положение $x_{0_{\text{сг}}}$ эквивалентного генератора, создающего уровень турбулентности ϵ_* , в зависимости от заданных величин x_0 и x_* .

Анализ опытных данных, полученных с использованием разных генераторов турбулентности, разного количества гасящих сеток n и разных их размеров M , позволил установить следующую эмпирическую зависимость:

$$\frac{x_{0_{\text{сг}}}}{x_*} = 0,41 \frac{x_0}{x_*} + 0,615 \quad (3.2)$$

Эта зависимость представлена кривой 5 на фиг. 5 вместе с опытными данными для разных наборов сеток при $n = 2$ и 3 . В верхней части графика изображена схема размещения реального генератора турбулентности 1, эквивалентного генератора турбулентности 2 и гасящей сетки 3 относительно измерительного

сечения 4. В случае $n = 3$ в качестве x_0 принималось значение $x_{0_{\text{eq}}}$, рассчитанное по формуле (3.2) для $n = 2$.

Определив с помощью соотношения (3.2) положение эквивалентного генератора турбулентности $x_{0_{\text{eq}}}$ и зная величину ε_* , которую можно рассматривать как собственную турбулентность искомого эквивалентного генератора турбулентности, можно оценить с помощью формулы (1.1) и размер ячейки эквивалентного генератора $M_{0_{\text{eq}}}$.

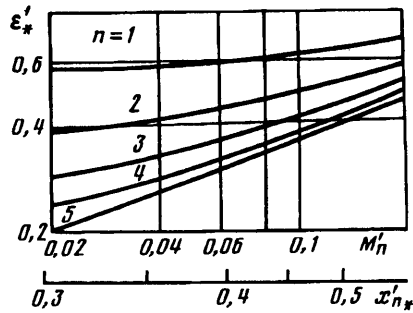
Таким образом, получены все необходимые данные для оптимального размещения n гасящих сеток с заданными размерами M_n их ячеек, а также для оценки эффективности полученного таким образом набора сеток. Расчет ведется по следующей схеме. Начальные условия набегающего потока определяются параметрами x_0 и M_0 генератора турбулентности (реального или условного), создающего уровень турбулентности ε_0 в измерительном сечении. При заданном размере ячейки первой гасящей сетки M_1 ее оптимальное положение x_{1*} находится по формуле (1.3), а коэффициент уменьшения турбулентности $\varepsilon_{1*}/\varepsilon_0$ — по формуле (1.5).

Чтобы определить оптимальное положение второй гасящей сетки с ячейкой размером M_2 , необходимо с помощью соотношения (3.2) по известным значениям x_0 и x_{1*} определить положение эквивалентного генератора $x_{0_{\text{eq}}}$, а по формуле (1.1), зная $x_{0_{\text{eq}}}$ и ε_{1*} , — размер его ячейки $M_{0_{\text{eq}}}$. Далее вновь по формулам (1.3) и (1.5) определяются соответственно оптимальное положение второй гасящей сетки x_{2*} и ее эффективность $\varepsilon_{2*}/\varepsilon_{1*}$ и так далее для всех остальных гасящих сеток набора. Во всех случаях предполагается, что сетки, используемые в наборе, имеют коэффициент заполнения $S = S_0 \approx 0,4$ ($M/d = 4-5$).

Предложенные здесь формулы справедливы только для оптимальных условий работы всех гасящих сеток набора. Для определения эффективности произвольно составленного набора гасящих сеток изложенная методика расчета неприменима.

Хотя ограничений на размеры ячеек M гасящих сеток до сих пор не накладывалось, тем не менее свобода выбора значений M не так уж велика. Об этом можно судить из следующего анализа. Обобщение результатов исследований показывает, что размеры гасящих сеток должны убывать в направлении потока. При этом, как отмечается в [2], для получения эффективной детурбулизации потока размеры ячеек соседних в наборе детурбулизирующих сеток не должны очень сильно различаться между собой. Из фиг. 1 и 4, а также из соотношений (1.3), (1.4) следует, что чем меньше размеры M гасящих сеток, тем более высокой эффективности можно добиться в подавлении турбулентности.

Однако на пути уменьшения M существуют два основных препятствия. Во-первых, использование очень мелких сеток в аэродинамических трубах нежелательно из-за того, что их естественное запыление может привести к неконтролируемому изменению параметров течения за сеткой [6]. Во-вторых, в реальных условиях работы аэродинамических труб расстояние между гасящей сеткой и измерительным сечением часто не может быть меньше некоторой величины x_{min} , определяемой, например, длиной сужающегося сопла, расположенного между форкамерой, где размещается сетка, и рабочей частью трубы, где находится измерительное сечение. В этом случае из-за большого расстояния x очень мелкая сетка может оказаться менее эффективной, чем более крупная сетка. Действительно, из соотношения (1.3) следует, что сетка с малыми значениями M наиболее эффективна, когда расстояние x_* мало. Если же окажется, что $x > x_*$, то эффективность гасящей сетки ухудшится в соответствии с формулой [4]



Фиг. 6

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_*} = 1,62 \left(\frac{x}{x_0} - \frac{x_*}{x_0} \right)^{1,6} + 1$$

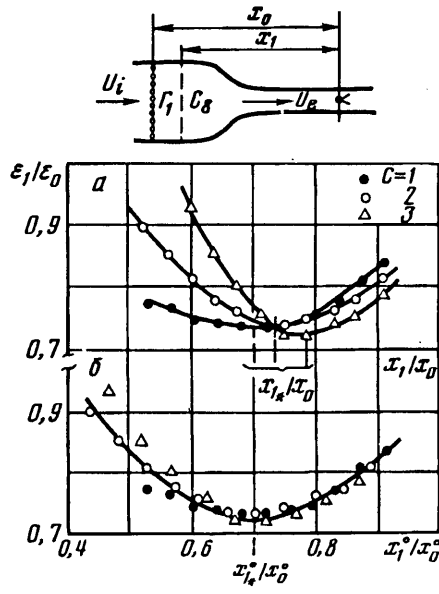
С целью иллюстрации влияния количества гасящих сеток и их размеров на эффективность подавления турбулентности набегающего потока на фиг. 6 приведены результаты расчетов по изложенной выше методике зависимости общего коэффициента уменьшения турбулентности $\varepsilon_*/\varepsilon_0$ от относительного размера M_n/M_0 последней в наборе сетки при разном количестве n гасящих сеток. При этом принималось, что коэффициент гидравлического сопротивления K для всех сеток равен единице (что соответствует $S \approx 0,4$). Было проведено два варианта расчета: в первом варианте считалось, что размер каждой сетки возрастает в направлении против потока в $\sqrt{M_n'}$ раз, а во втором размеры всех гасящих сеток были одинаковыми.

Оказалось, что эффективность подавления турбулентности набегающего потока практически не зависит от того, являются ли размеры сеток в наборе разными или одинаковыми. Разница состоит лишь в том, что в наборе из сеток, размеры которых уменьшаются в направлении потока, сетки равномерно распределены на участке между генератором и последней гасящей сеткой, а в наборе из одинаковых сеток все они должны быть сосредоточены в окрестности значения $x_{n*}' = x_{n*}/x_0$, соответствующего выбранному значению M_n' (см. шкалу x_{n*}' на фиг. 6, параллельную шкалу M_n').

Предпочтение следует отдать все же набору из сеток разных размеров, поскольку в этом варианте расположенные вверх по потоку более крупные сетки оказывают более сильное воздействие на возможные неравномерности поля средней и пульсационной скорости набегающего потока, которые могут иметь место в условиях аэродинамической трубы.

Анализ расчетных данных, приведенных на фиг. 6, показывает, что уже при $n = 5$ общий коэффициент уменьшения турбулентности $\varepsilon_*' = \varepsilon_*/\varepsilon_0$ приближается к относительной величине собственной турбулентности ε_{s_n}' , порождаемой последней гасящей сеткой в наборе. Следовательно, применение большего количества сеток в наборе ($n > 5$) нецелесообразно. Что же касается величины максимального уменьшения турбулентности набегающего потока с помощью набора гасящих сеток, то она в большой степени определяется размером ячейки M_n последней гасящей сетки набора, который в свою очередь зависит от того, насколько близко от измерительного сечения можно установить последнюю сетку набора.

Например, уменьшения степени турбулентности набегающего потока в 5 раз можно добиться, если составить набор из 5 гасящих сеток, в последней из которых размер ячейки в 50 раз меньше размера ячейки реального или условного генератора турбулентности (см. фиг. 6). При этом последняя сетка должна располагаться на



Фиг. 7

относительно близком расстоянии $x' \approx 0,3$ от измерительного сечения. Если же, например, последняя сетка может быть установлена только на расстоянии $x' \geq 0,4$, то набор из пяти сеток даст уменьшение ϵ_0 лишь втрое, при этом относительный размер ячейки последней гасящей сетки составит $M_3' \approx 0,06$. Отметим, однако, что с уменьшением количества гасящих сеток влияние параметров M_n' и x_{n*}' на отношение ϵ_*' уменьшается и при $n = 1$ это отношение имеет почти постоянное значение $\epsilon_*' = 0,6-0,65$ в широком диапазоне изменения значений M' и x' .

4. Приведенные выше результаты определения оптимального места расположения гасящих сеток получены для плоскопараллельного потока. Однако, как показано в [7], их можно распространить и на условия течения в аэродинамической трубе с переменным по длине канала трубы поперечным сечением, в частности, когда гасящие сетки устанавливаются в форкамере трубы перед сужающимся соплом, а измерительное сечение находится в рабочей части трубы. В этом случае расстояния x_0 и x_1 следует заменить эквивалентными расстояниями x_0^0 и x_1^0 , определяемыми с учетом изменения скорости потока по длине трубы с помощью преобразования координат

$$x^0 = U_i \int_0^x \frac{dx}{U(x)} \tag{4.1}$$

где U_i — начальная скорость потока перед сужающимся соплом трубы. С физической точки зрения величина x^0 соответствует тому расстоянию от сетки, которое успел бы пройти поток за сеткой за время $t = \int_0^x dx/U(x)$ при постоянной скорости $U = U_i$, соответствующей скорости обтекания сетки.

На фиг. 7, а представлены опытные данные в виде зависимости отношения ϵ_1/ϵ_0 от относительного расстояния x_1/x_0 для разных значений коэффициента поджатыя потока $C = U_e/U_i = 1, 2$ и 4 . Здесь U_i и U_e — значения скорости потока в начале и в конце сужающегося сопла. Эти результаты получены при постоянном значении $U_i = 3,8$ м/с с использованием детурбулизирующей сетки С8, установленной за

генератором турбулентности Г1 (см. выше). Как видно, оптимальное значение x_{1*}/x_0 , при котором наблюдается минимальное значение $\varepsilon_1/\varepsilon_0$, разное для разных значений C , при этом с увеличением C величина x_{1*}/x_0 возрастает. Если же заменить отношение x_1/x_0 отношением эквивалентных расстояний x_1^0/x_0^0 по (4.1), то это приведет к совмещению минимумов кривых $\varepsilon_1/\varepsilon_0 = f(x_1^0/x_0^0)$, соответствующих разным значениям коэффициента поджатия (фиг. 7, б).

Отметим, что указанный прием позволяет правильно определить значения x_{1*} , при которых отношение $\varepsilon_1/\varepsilon_0$ минимально, независимо от степени поджатия потока. Для учета же влияния поджатия потока на саму величину ε следует воспользоваться методом, рассмотренным, например, в [8].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Scheiman J., Brooks J. D.* Comparison of experimental and theoretical turbulence reduction from screens, honeycomb, and honeycomb-screen combinations//J. Aircraft. 1981. V. 18. № 8. P. 638—643.
2. *Tan-Atichat 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. V. 114. P. 501—528.
3. *Groth J., Johansson A. V.* Turbulence reduction by screens//J. Fluid Mech. 1988. V. 197. P. 139—155.
4. *Дербунович Г. И., Земская А. С., Репик Е. У., Соседко Ю. П.* Оптимальные условия управления интенсивностью турбулентности потока с помощью сеток//Механика неоднородных и турбулентных потоков. М.: Наука, 1989. С. 35—44.
5. *Дербунович Г. И., Земская А. С., Репик Е. У., Соседко Ю. П.* Использование сеток для управления структурой турбулентного потока в аэродинамических трубах//Уч. зап. ЦАГИ. 1982. Т. 13. № 1. С. 11—20.
6. *Owen F. K.* An assessment of flow-field simulation and measurement//AIAA Pap. 1983. № 1721. 25 p.
7. *Дербунович Г. И., Земская А. С., Репик Е. У., Соседко Ю. П.* Оптимальные условия гашения турбулентности потока в рабочей части аэродинамической трубы с помощью сеток, установленных в форкамере//Уч. зап. ЦАГИ. 1989. Т. 20. № 3. С. 37—43.
8. *Дербунович Г. И., Земская А. С., Репик Е. У., Соседко Ю. П.* Влияние конфузорности течения на уровень турбулентности потока//Изв. АН СССР. МЖГ. 1987. № 2. С. 146—152.

Москва

Поступила в редакцию
26.VI.1991