

УДК 532.526.3  
DOI: 10.15372/PMTF202315429

## ВЛИЯНИЕ ОДНОРОДНЫХ ПО РАЗМАХУ ПОЛОС НА ПЕРЕХОД ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ НА СКОЛЬЗЯЩЕМ КРЫЛЕ ПРИ ПОВЫШЕННОЙ ЗАВИХРЕННОСТИ ПОТОКА

В. И. Бородулин, А. В. Иванов, Ю. С. Качанов

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН,  
Новосибирск, Россия

E-mails: Bo@itam.nsc.ru, andi@itam.nsc.ru, kachanov@itam.nsc.ru

Изучается влияние однородных по размаху элементов шероховатости (полос) на переход к турбулентности пограничного слоя на скользящем крыле с доминированием неустойчивости поперечного течения при наличии нестационарных и стационарных вихрей набегающего потока. Измерения выполнены для прямоугольных (в плоскости, параллельной потоку и нормальной к стенке) неровностей поверхности типа полос различной высоты, имеющих две разные ширины в направлении хорды. Эксперименты проведены в малотурбулентной аэродинамической трубе при малых дозвуковых скоростях набегающего потока с помощью метода термоанемометрии. Исследования выполнены в диапазоне единичных чисел Рейнольдса (определенных по продольной составляющей скорости на границе пограничного слоя в начале области неровности поверхности)  $0,687 \cdot 10^6 \div 1,568 \cdot 10^6$  1/м. Результаты получены в 76 режимах измерений для инициируемых двумя турбулизирующими сетками вихревых возмущений свободного потока двух типов: преимущественно нестационарных и с комбинацией стационарных и нестационарных возмущений.

**Ключевые слова:** пограничный слой, скользящее крыло, переход к турбулентности, повышенная завихренность потока, однородные по размаху неровности поверхности

**Введение.** Известно, что снижение аэродинамического сопротивления позволяет улучшить характеристики аэродинамики современного самолета и способно, в частности, обеспечить повышение аэродинамического качества и значительное уменьшение расхода топлива (см. работу [1] и библиографию к ней). Поскольку на типичных транспортных самолетах пограничный слой в основном турбулентный [2], эффективным способом снижения аэродинамического сопротивления может быть применение различных средств управления ламинарным пограничным слоем, таких как ламинаризованные аэродинамические профили, поскольку коэффициенты турбулентного поверхностного трения часто на порядок и более превышают коэффициенты ламинарного трения [3].

Одна из основных трудностей ламинаризации пограничных слоев на поверхностях крыльев реальных самолетов связана с наличием различных дефектов поверхностей, вызывающих преждевременный переход к турбулентности (см., например, [4, 5]). Поэтому

Работа выполнена при финансовой поддержке компании Boeing Operations International, Inc. (соглашение № 106 с Институтом теоретической и прикладной механики СО РАН) и при частичной финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственное задание № 121030500149-8).

необходимо знать, какие виды дефектов поверхности и в какой степени оказывают влияние на положение начала турбулизации течения.

Решение данной задачи зависит от того, какие возмущения течений в пограничном слое наиболее значительно усиливаются вследствие неустойчивости и, соответственно, наиболее существенны в процессе турбулизации течения. Как известно, в двумерных пограничных слоях при дозвуковых скоростях такими возмущениями являются, прежде всего, двумерные и трехмерные волны Толлмина — Шлихтинга [6]. В трехмерных пограничных слоях на начальном участке обтекания (в области благоприятного градиента давления) неустойчивость Толлмина — Шлихтинга подавлена и основную роль играет существенно трехмерная неустойчивость поперечного течения (ПТ) [7]. В отличие от мод неустойчивости Толлмина — Шлихтинга, которые всегда нестационарны, моды неустойчивости ПТ могут также иметь нулевую частоту и представлять собой стационарные вихри, ориентированные под малым углом к направлению вектора средней скорости на границе пограничного слоя. Это отличие играет важную роль при воздействии неоднородностей поверхности на переход к турбулентности.

Все дефекты аэродинамических поверхностей можно разделить на две категории: 1) двумерные дефекты; 2) трехмерные дефекты. Влияние указанных дефектов на устойчивость основного потока, его восприимчивость к возмущениям и ламинарно-турбулентный переход существенно различается. Так же это влияние существенно различается в двумерных и трехмерных потоках. В частности, в двумерных пограничных слоях, где преобладают волны Толлмина — Шлихтинга, даже микроскопические двумерные и трехмерные дефекты поверхности способны оказывать значительное влияние как на сценарии перехода, так и на положение начала турбулизации течения (см., например, [8–11]).

Между тем в трехмерных пограничных слоях на стреловидных крыльях ситуация иная. Трехмерные неоднородности поверхности могут оказывать существенное влияние на положение начала турбулизации потока. Это влияние может быть даже сильнее, чем в двумерных пограничных слоях. В то же время двумерные препятствия, однородные по размаху, могут оказывать очень незначительное влияние на переход, в случае если он инициируется существенно трехмерными модами неустойчивости ПТ (см., например, [12, 13]).

В работе [10] отмечалось, что для случаев течений на скользящих крыльях с преобладанием неустойчивости ПТ необходимы дополнительные исследования. Это утверждение справедливо также в случаях, когда переход инициируется бегущими модами неустойчивости (волнами) ПТ или комбинацией вихрей и волн ПТ. Действительно, результаты проведенных ранее исследований (см., например, [7, 14–19]) показали, что трехмерная (неоднородная в направлении размаха) шероховатость поверхности может существенно влиять на положение перехода в течениях в пограничных слоях на скользящих крыльях. Исследования проводились либо для распределенной шероховатости, либо для локализованных элементов шероховатости различной формы и высоты. Такая трехмерная шероховатость важна для возбуждения существенно трехмерных вихрей ПТ.

Тем не менее некоторые двумерные (однородные по размаху) неровности могут присутствовать на поверхности тел, используемых во многих практических приложениях (ступенчатые уступы, выступы, полосы или канавки). Данные двумерные элементы шероховатости не могут непосредственно порождать трехмерные вихри неустойчивости ПТ, по крайней мере, в случаях эволюционных сценариев перехода, когда переходный процесс инициируется вихрями и волнами неустойчивости ПТ. Однако при наличии стационарных и (или) нестационарных трехмерных возмущений набегающего потока влияние таких двумерных препятствий возрастает, поскольку они способствуют преобразованию вихрей набегающего потока в трехмерные стационарные и (или) нестационарные моды неустойчивости ПТ.

Следует отметить, что все известные сценарии перехода к турбулентности в трехмерном пограничном слое в ряде работ (см., например, [7, 20–22]) были разделены на две основные группы: 1) сценарии эволюционного перехода; 2) сценарии внезапного перехода. (Последние могут быть как стационарными, так и нестационарными.) Сценарии эволюционного перехода (см., например, [7, 17, 18]) связаны с постепенным усилением мод первичной неустойчивости ПТ (стационарных, нестационарных низкочастотных или и тех и других), приводящим к появлению локализованной либо в пространстве, либо во времени и пространстве высокочастотной вторичной неустойчивости. Между тем внезапный переход характеризуется сильным искажением исходного течения в пограничном слое, вызванным, например, большой неоднородностью поверхности и приводящим к сильной первичной неустойчивости основного потока и очень быстрому (резкому) разрушению ламинарного течения вблизи этой неоднородности [7]. Диапазон частот увеличивающихся возмущений существенно зависит от степени и характера искажения исходного пограничного слоя указанной неоднородностью. В некоторых случаях такой внезапный переход не существует постоянно, а появляется спорадически, при этом в промежутках между этими временными интервалами наблюдается эволюционный переход. Такие режимы соответствуют сценарию нестационарного внезапного перехода.

В данных экспериментах исследуется влияние однородных по размаху элементов шероховатости в виде полос, прямоугольных элементов (в продольной относительно потока плоскости, перпендикулярной стенке) на сценарии и положение перехода к турбулентности. Каждый элемент шероховатости такого рода представляет собой двумерное препятствие в виде комбинации выступа и последующего уступа. Однако в тех случаях, когда ширина элемента шероховатости (его размер в направлении хорды) очень велика, влияние уступа, по-видимому, становится менее существенным и исследуемый элемент шероховатости можно рассматривать как выступ.

Целями данной работы являются изучение влияния описанных выше однородных по размаху элементов шероховатости на ламинарно-турбулентный переход пограничного слоя на скользящем крыле, инициируемый модами неустойчивости ПТ при наличии нестационарных и стационарных вихрей набегающего потока, и получение оценок предельных высот таких двумерных элементов шероховатости при наличии турбулентности и стационарных возмущений набегающего потока, которые не приводят к смене сценария эволюционного перехода на сценарий внезапного перехода.

Эксперименты, описанные в настоящей работе, были выполнены в 2011 г. в рамках исследовательского контракта между Институтом теоретической и прикладной механики (ИТПМ) СО РАН и Boeing Operations International, Inc., но их результаты ранее публиковались только в технических отчетах [23, 24].

**1. Метод измерений и характеристики основного потока.** Ниже приводится описание методики измерений и полученных характеристик потока.

1.1. *Методика эксперимента.* Эксперименты были выполнены в малотурбулентной аэродинамической трубе Т-324 ИТПМ СО РАН при повышенных уровнях турбулентности набегающего потока. Измерения проводились с помощью термоанемометра на экспериментальной модели скользящего крыла (с углом скольжения  $\chi = 35^\circ$ ) (см., например, [7]). С использованием экспериментальной модели, состоящей из скользящей пластины, профилированной ложной стенки и двух профилированных боковых стенок, создавалось течение в пограничном слое, характерное для скользящего крыла бесконечного размаха (без учета кривизны поверхности). Наиболее важные характеристики этой модели и основного потока для низкого уровня турбулентности приведены в [7]. В изученных в данной работе случаях повышенной степени турбулентности требуемые уровни возмущений набегающего потока были получены с помощью турбулизирующих сеток, установленных на

Таблица 1  
Изученные режимы и их обозначения

Тип сетки	Высота полосы $H$	Ширина полосы $l'_r$	Режим			
			$n = 120$ об/мин	$n = 160$ об/мин	$n = 200$ об/мин	$n = 240$ об/мин
G1 (1,5 × 22,5 мм)	H0 (без полосы)	W0 (без полосы)	W0H0G1n120	W0H0G1n160	W0H0G1n200	W0H0G1n200
	H1 (82 мкм)	W1 (50 мм) W2 (150 мм)	W1H1G1n120 W2H1G1n120	W1H1G1n160 W2H1G1n160	W1H1G1n200 W2H1G1n200	W1H1G1n240 W2H1G1n240
	H2 (176 мкм)	W1 (50 мм) W2 (150 мм)	W1H2G1n120 W2H2G1n120	W1H2G1n160 W2H2G1n160	W1H2G1n200 W2H2G1n200	W1H2G1n240 W2H2G1n240
	H3 (365 мкм)	W1 (50 мм) W2 (150 мм)	W1H3G1n120 W2H3G1n120	W1H3G1n160 W2H3G1n160	W1H3G1n200 W2H3G1n200	W1H3G1n240 W2H3G1n240
	H4 (838 мкм)	W1 (50 мм) W2 (150 мм)	W1H4G1n120 W2H4G1n120	W1H4G1n160 W2H4G1n160	W1H4G1n200 W2H4G1n200	W1H4G1n240 W2H4G1n240
G9 (0,14 × 10,0 мм)	H5 (1103 мкм)	W1 (50 мм) W1P (50 мм) W2 (150 мм)	W1H5G1n120 W1PH5G1n120 W2H5G1n120	W1H5G1n160 W1PH5G1n160 W2H5G1n160	W1H5G1n200 W1PH5G1n200 W2H5G1n200	W1H5G1n240 W1PH5G1n240 W2H5G1n240
	H0 (без полосы)	W0 (без полосы)	W0H0G9n120	W0H0G9n160	W0H0G9n200	W0H0G9n240
	H3 (365 мкм)	W1 (50 мм) W2 (150 мм)	W1H3G9n120 W2H3G9n120	W1H3G9n160 W2H3G9n160	W1H3G9n200 W2H3G9n200	W1H3G9n240 W2H3G9n240
	H4 (838 мкм)	W1 (50 мм) W2 (150 мм)	W1H4G9n120 W2H4G9n120	W1H4G9n160 W2H4G9n160	W1H4G9n200 W2H4G9n200	W1H4G9n240 W2H4G9n240
	H5 (1103 мкм)	W1 (50 мм) W2 (150 мм)	W1H5G9n120 W2H5G9n120	W1H5G9n160 W2H5G9n160	W1H5G9n200 W2H5G9n200	W1H5G9n240 W2H5G9n240

входе в рабочую часть аэродинамической трубы. Характеристики основного потока для такой же экспериментальной модели обсуждаются ниже и сопоставляются с полученными ранее.

Контролируемые элементы шероховатости поверхности (однородные по ширине пластиковые полосы с прямоугольным поперечным сечением) различной высоты и длины вдоль хорды (подробно описанные ниже) наклеивались на поверхность скользящей пластины. Координата передней кромки всех элементов шероховатости равна  $x_c = x_{crb} = 169,5$  мм ( $x' = x'_{rb} = 138,8$  мм). Здесь  $x_c$  — координата в направлении потока, начало которой находится на передней кромке скользящей пластины;  $x'$  — координата в направлении хорды модели, перпендикулярная ее передней кромке, т. е.  $x' = x_c \cos(\chi)$ . Было изучено пять высот полос неровностей, ширина которых в направлении хорды  $l_r$  была равна 50 либо 150 мм. Таким образом, нижние по потоку края полос шероховатости находились в точке с координатой  $x_c = x_{cr1} = 230,5$  мм ( $x' = x'_{r1} = 188,8$  мм) при  $l'_r = l'_{r1} = 50$  мм либо  $x_c = x_{cr2} = 352,6$  мм ( $x' = x'_{r2} = 288,8$  мм) при  $l'_r = l'_{r2} = 150$  мм. Измерения проводились с помощью двух существенно разных турбулизирующих сеток (G1 и G9) при числе оборотов вентилятора аэродинамической трубы  $n = 120, 160, 200, 240$  об/мин. Используемые сетки, установленные в начале рабочей части аэродинамической трубы на расстоянии от передней кромки скользящей пластины, приближенно равном 2 м, имели

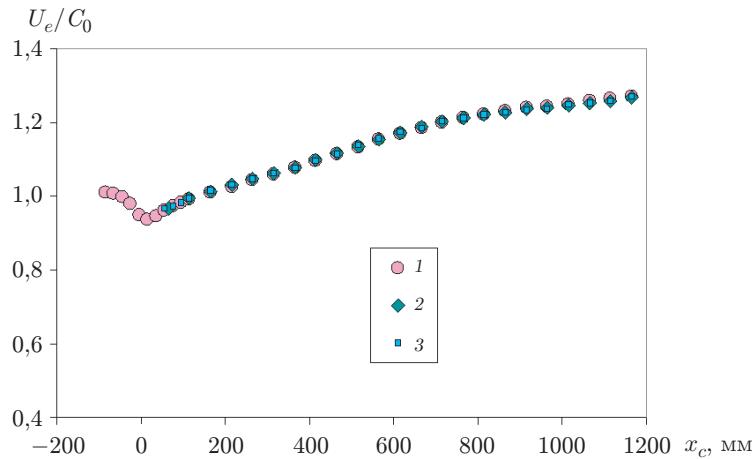


Рис. 1. Продольные распределения продольной компоненты скорости потенциального потока  $U_e/C_0$ , измеренной на расстоянии  $y = 30$  мм от стенки при  $z = 50$  мм по размаху:

1 — в отсутствие сетки (режим G0), 2 — для сетки G1, 3 — для сетки G9

различное аэродинамическое сопротивление, при этом реализовывались разные значения скорости набегающего потока при одной и той же величине  $n$ .

Было исследовано 76 режимов с различными комбинациями типа турбулизирующей сетки, высоты и ширины неровности и частоты вращения вентилятора аэrodинамической трубы (задававшей скорость набегающего потока). Изученные режимы представлены в табл. 1.

**1.2. Характеристики основного потока.** С использованием экспериментальной модели создавалось течение на начальном участке скользящего крыла, на котором течение ускоряется (рис. 1). Это позволяло подавлять неустойчивость Толлмина — Шлихтинга и инициировать процесс перехода за счет неустойчивости ПТ. Измерения показали, что структура потенциального потока не зависит от наличия турбулизирующих сеток G1 и G9 (см. рис. 1). В проведенных ранее экспериментах (см., например, [25]) показана также независимость (в пределах погрешности измерений) структуры невязкого течения от скорости набегающего потока в диапазоне скоростей, включающем диапазон, изученный в данной работе.

Модель была оснащена двумя боковыми ложными стенками, что обеспечивало выполнение условия скольжения  $W'_e = \text{const} = \sin(\chi)$ , характерного для крыла бесконечного размаха с углом скольжения  $\chi = 35^\circ$  (рис. 2).

Значения скорости набегающего потока  $C_0$ , продольной компоненты скорости на границе пограничного слоя  $U_{erb}$ , единичных чисел Рейнольдса  $Re_1 = C_0/\nu$  и  $Re_{1rb} = U_{erb}/\nu$  (нижний индекс  $rb$  соответствует началу области шероховатости при  $x_{crb} = 169,5$  мм,  $x'_{rb} = 138,8$  мм) приведены в табл. 2 для всех исследованных режимов.

Средняя скорость по нормали к стенке измерялась как при наличии сеток (G1 и G9), так и в их отсутствие (режим G0) при  $n = 120$  об/мин (см. табл. 2). Измерения были выполнены при  $x' = x'_{rb} = 138,8$  мм, а также при  $x'_{r1} = 188,8$  мм,  $x'_{r2} = 238,8$  мм,  $x'_{r2} = 288,8$  мм. Координаты  $x'_{r1}$  и  $x'_{r2}$  соответствовали задним кромкам полос шероховатости W1 ( $l'_r = l'_{r1} = 50$  мм) и W2 ( $l'_r = l'_{r2} = 150$  мм). Положение измеренных профилей в направлении размаха соответствовало координате  $z = 50$  мм и приблизительно совпадало с центром области измерений.

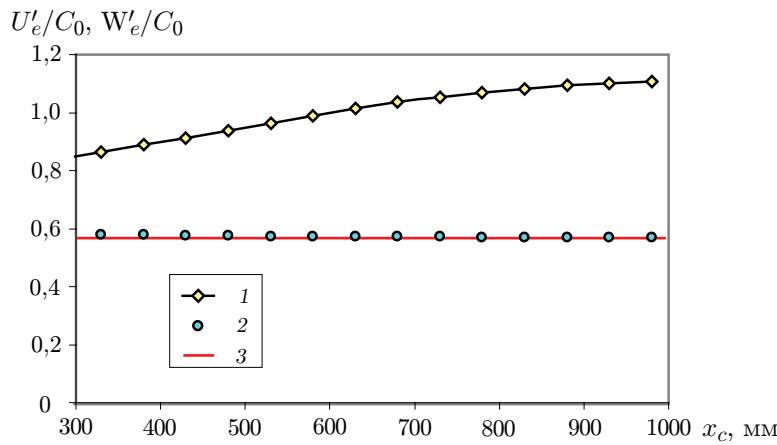


Рис. 2. Продольные распределения компонент вектора скорости потенциального потока в направлении хорды  $U'_e$  (1) и размаха  $W'_e$  (2), измеренных в режиме G0, а также рассчитанных по условию скольжения  $W'_e = \sin(\chi)$  (3)

Таблица 2

## Параметры основного потока в изученных режимах

Тип сетки	$n$ , об/мин	$C_0$ , м/с	$U_{erb}$ , м/с	$\text{Re}_1 \cdot 10^{-3}$ , м $^{-1}$	$\text{Re}_{1rb} \cdot 10^{-3}$ , м $^{-1}$
G0 (без сетки)	120	12,01	11,62	768	743
	160	16,15	15,63	1032	999
	200	20,41	19,75	1306	1264
	240	24,55	23,76	1568	1517
G1 (1,5 × 22,5 мм)	120	10,47	10,13	687	665
	160	14,36	13,89	942	911
	200	17,97	17,39	1180	1141
	240	21,64	20,94	1419	1373
G9 (0,14 × 10,0 мм)	120	11,49	11,12	733	710
	160	15,58	15,08	994	962
	200	19,67	19,03	1255	1215
	240	23,71	22,94	1511	1462

На рис. 3 представлены результаты, полученные при  $x'_{rb} = 138,8$  мм,  $x'_{r1} = 188,8$  мм, а также результаты расчетов для автомодельного течения с параметром Хартри  $\beta_H = 0,207$  ( $x_c = 200$  мм,  $x' = 163,8$  мм), описываемого уравнениями Фолкнера — Скэн — Кука. Результаты, представленные на рис. 3, показывают, что наличие турбулизирующих сеток G1, G9 не влияет на форму профилей продольной компоненты средней скорости пограничного слоя.

В результате интегрирования профилей измеренной средней скорости получены значения интегральных параметров пограничного слоя и локальных чисел Рейнольдса в четырех точках, указанных выше. Значения этих параметров приведены в табл. 3 ( $\text{Re}_{rb} = \text{Re}_{1rb} \delta_{1rb}$ ).

Таким образом, измерения показали, что турбулизирующие сетки G1 и G9 не влияют на структуру пограничного слоя в направлении потока в области, где расположены элементы шероховатости. Это означает, что амплитуды вихрей в свободном потоке, изученные в настоящих экспериментах, можно рассматривать как малые в том смысле, что указанные вихри (как турбулентность, так и стационарные вихри) не изменяют основной поток,

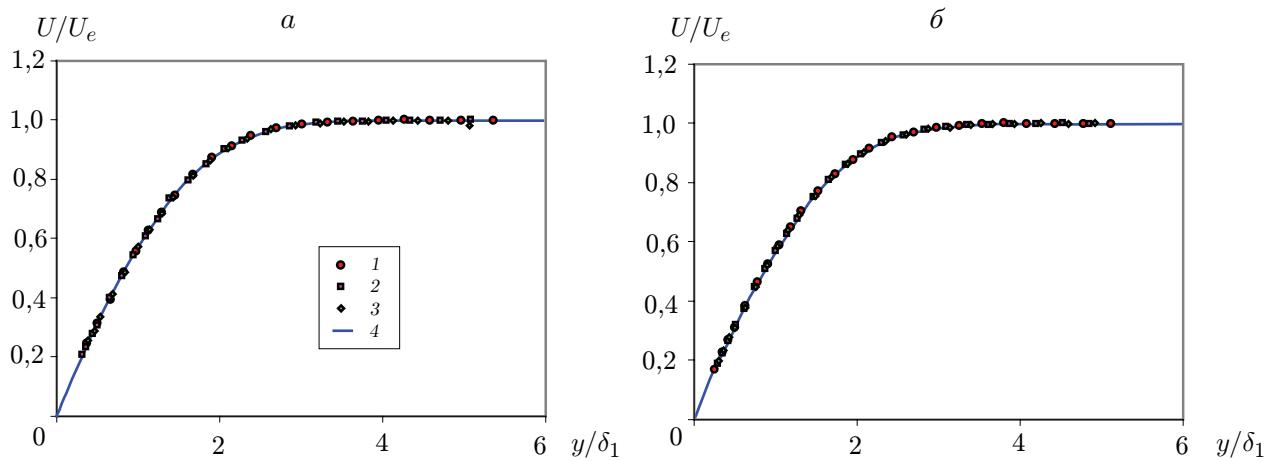


Рис. 3. Профили средней скорости в направлении нормали к стенке при  $n = 120$  об/мин и  $x'_{rb} = 138,8$  мм (а),  $x'_{r1} = 188,8$  мм (б):

1 — без сетки (режим G0), 2 — при наличии сетки G1, 3 — при наличии сетки G9,  
4 — теоретический профиль при  $\beta_H = 0,207$

Таблица 3  
Значения толщины вытеснения  $\delta_{1rb}$ ,  $\delta_{1r1}$ ,  $\delta_{1r2}$  и числа Рейнольдса  $Re_{rb}$

Тип сетки	$n$ , об/мин	$\delta_{1rb}$	$\delta_{1r1}$	$\delta_{1r2}$	$Re_{rb}$
G0 (без сетки)	120	0,638	0,724	0,824	474
	160	0,550	0,624	0,711	550
	200	0,489	0,555	0,632	618
	240	0,446	0,506	0,577	677
G1 ( $1,5 \times 22,5$ мм)	120	0,677	0,767	0,886	450
	160	0,578	0,655	0,756	527
	200	0,517	0,585	0,676	590
	240	0,471	0,534	0,616	647
G9 ( $0,14 \times 10,0$ мм)	120	0,669	0,758	0,882	475
	160	0,574	0,651	0,758	552
	200	0,511	0,579	0,674	621
	240	0,466	0,528	0,614	681

по крайней мере, для исследованного положения рассматриваемых полос шероховатости. В частности, это обстоятельство обосновывает правомерность использования теории линейной устойчивости для расчета N-факторов нарастания мод неустойчивости в условиях настоящих экспериментов как при наличии, так и в отсутствие сеток.

**2. Однородные по размаху контролируемые элементы шероховатости.** Даные элементы представляют собой наклеенные на поверхность скользящей пластины полосы, имеющие большую длину по размаху, значительно превышающую размеры области измерений параметров процесса перехода к турбулентности. На рис. 4 показан пример такой полосы W1H2. Параметры полос (высота  $H$  и ширина  $l'_r$ ), используемых в настоящих экспериментах, приведены в табл. 1.

Следует отметить, что расстояние от передней кромки пластины  $x'_{rb} = 138,8$  мм до начала области шероховатости достаточно мало и наибольшая ширина элементов шероховатости  $W2$  ( $l'_r = 150$  мм) сопоставима с этим расстоянием. Задняя кромка шероховатости  $W2$  находится на большом расстоянии от ее передней кромки и расположена

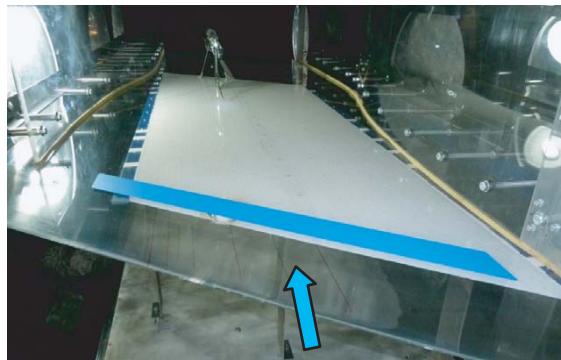


Рис. 4. Полоса шероховатости W1H2, наклеенная на пластину (стрелка — направление набегающего потока)

значительно дальше от передней кромки скользящей пластины, где толщина пограничного слоя значительно больше, что может привести к уменьшению влиянию задней кромки элемента шероховатости на процесс перехода.

При изготовлении полос шероховатости использовалась следующая технология. Полосы высотой H1, H2 и H3 были вырезаны из одного или нескольких слоев самоклеющейся пленки с номинальной толщиной 0,08 мм. Для изготовления элемента шероховатости высотой H1 был использован один слой пленки, для элемента шероховатости высотой H2 — два слоя, для элемента шероховатости высотой H3 — четыре слоя. В тех случаях, когда использовалось более одного слоя пленки, слои наклеивались один на другой, до тех пор пока не достигалась необходимая толщина материала. Затем полученная многослойная пленка разрезалась на полосы нужной ширины (W1 либо W2).

Особое внимание уделялось обеспечению максимально возможной двумерности полос шероховатости. В частности, в случае многослойных полос шероховатости требовалось не допустить попадания пузырьков воздуха, частиц пыли или волокон между слоями и избежать возникновения соответствующих деформаций. Использованная технология позволила получить однородные многослойные пленки, не содержащие каких-либо трехмерных элементов даже в наиболее сложном случае элемента шероховатости высотой H3, состоящего из четырех слоев. При изготовлении полос шероховатости большое внимание уделялось обеспечению остроты и прямолинейности их кромок.

Полосы большой высоты H4 и H5 изготавливались из поливинилхлоридной пленки с номинальной толщиной 0,7 и 1,0 мм.

Поскольку в данной работе исследовались элементы шероховатости поверхности очень простой формы и в каждом эксперименте наклеивалась одна полоса, имеется только два определяющих параметра, описывающих эту форму: ширина  $l'_r$  и высота  $H$  (см. табл. 1). Соответствующие безразмерные значения высоты, нормированной на толщину вытеснения пограничного слоя  $\delta_{1rb}$ , измеренную в месте расположения передних кромок полос шероховатости (но в их отсутствие), приведены в табл. 4. Заметим, что длина полосы параметром настоящего исследования не является, поскольку ее края находились за пределами области исследований и на процесс перехода в этой области не влияли (см. рис. 4), что было подтверждено результатами измерений.

Изученный диапазон безразмерных высот полос шероховатости  $H/\delta_{1rb}$  больше диапазона размерных высот (вследствие изменения толщины вытеснения пограничного слоя) и включает значения от 12,0 до 236,8 %. Следует отметить, что во всех режимах высота исследуемых полос шероховатости H4, H5 больше толщины вытеснения пограничного

Таблица 4  
Безразмерные значения толщины  $H/\delta_{1rb}$  передних кромок полос шероховатости ( $x_c = x_{crb}$ )

Высота полосы	$H/\delta_{1rb}$							
	Сетка G1				Сетка G9			
	$n = 120$ об/мин	$n = 160$ об/мин	$n = 200$ об/мин	$n = 240$ об/мин	$n = 120$ об/мин	$n = 160$ об/мин	$n = 200$ об/мин	$n = 240$ об/мин
H1 = 82 мкм	12,0	14,1	15,8	17,3	12,2	14,2	16,0	17,5
H2 = 176 мкм	25,9	30,3	34,0	37,2	26,3	30,6	34,3	37,7
H3 = 365 мкм	54,0	63,2	70,7	77,5	54,6	63,6	71,5	78,5
H4 = 838 мкм	123,8	144,9	162,2	177,9	125,4	146,0	164,1	180,0
H5 = 1103 мкм	162,8	190,7	213,4	234,0	164,9	192,1	215,8	236,8

Таблица 5  
Значения числа Рейнольдса, вычисленные по высоте полос,  $Re_{hrb} = H Re_{1rb}$  при  $x_c = x_{crb}$

Высота полосы	$Re_{hrb}$							
	Сетка G1				Сетка G9			
	$n = 120$ об/мин	$n = 160$ об/мин	$n = 200$ об/мин	$n = 240$ об/мин	$n = 120$ об/мин	$n = 160$ об/мин	$n = 200$ об/мин	$n = 240$ об/мин
H1 = 82 мкм	54	74	93	112	58	79	99	119
H2 = 176 мкм	117	160	200	241	125	169	213	257
H3 = 365 мкм	243	333	417	502	259	352	444	534
H4 = 838 мкм	558	764	957	1151	595	807	1019	1226
H5 = 1103 мкм	733	1005	1258	1514	783	1061	1340	1613

слоя ( $H/\delta_{1rb} > 100\%$ ). Существуют режимы, в которых высота элемента шероховатости превышает толщину вытеснения в 2,4 раза. Также следует отметить, что величина естественных (неконтролируемых) квазидвумерных неоднородностей поверхности для настоящей экспериментальной модели была, по крайней мере, на два порядка меньше высоты наименьшей исследованной полосы контролируемой шероховатости.

Другим возможным способом нормировки высот полос шероховатости является использование чисел Рейнольдса, вычисленных по их высоте и по скорости потенциального потока  $U_{erb}$  на их передних кромках ( $x'_{rb} = 138,8$  мм):  $Re_{hrb} = H U_{erb}/\nu = H Re_{1rb}$ . Значения этих чисел Рейнольдса для всех изученных случаев приведены в табл. 5. Наибольшее значение числа Рейнольдса, вычисленное по высоте контролируемой шероховатости,  $Re_{hrb} = 1613$  достигается в режимах W1H5G9n240 и W2H5G9n240 (см. табл. 1), в то время как его наименьшее значение  $Re_{hrb} = 54$  наблюдается в режимах W1H1G9n120 и W2H1G9n120. Таким образом, наименьшее значение числа Рейнольдса, вычисленное по высоте элемента шероховатости, для исследованных контролируемых полос в 30 раз меньше наибольшего значения.

**3. Контролируемые вихри набегающего потока.** Проведено сравнение сценариев и положения перехода при наличии интенсивных нестационарных вихрей свободного потока (создаваемых сеткой G1) либо слабых стационарных вихрей в комбинации с нестационарными (создаваемыми сеткой G9). Сетка G1, изготовленная из сетки-рабицы, имеет ромбовидные ячейки размером приблизительно 22,5 мм, сплетенные из проволоки диаметром 1,5 мм, и создает умеренные нестационарные вихри свободного потока с непрерывным широкополосным частотным спектром. С помощью сетки G9, изготовленной из переплетенной лески небольшого диаметра (0,14 мм) и имеющей квадратные ячейки раз-

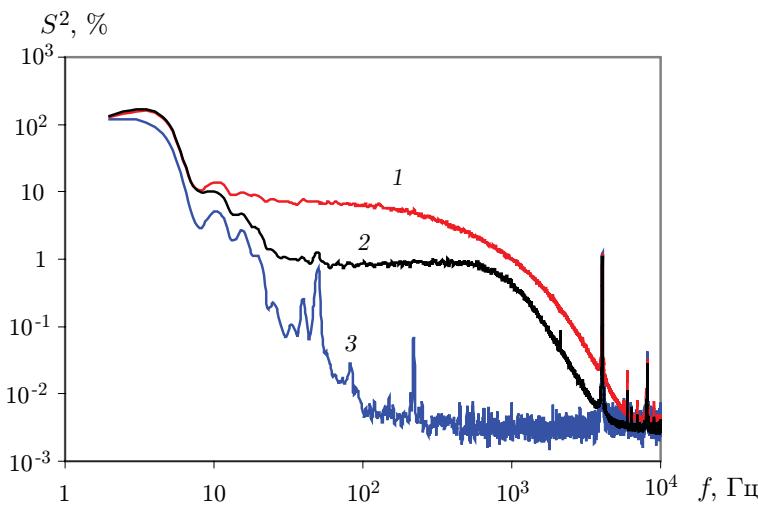


Рис. 5. Частотные спектры нестационарных вихрей, создаваемых сетками G1 (1) и G9 (2), а также в случае отсутствия сетки G0 (3) при  $n = 200$ ,  $x_c = 158$  мм,  $y = 30$  мм,  $z = 20 \div 80$  мм

мером 10 мм, обеспечивались наименьший уровень сеточной турбулентности и слабые, но измеряемые стационарные вихри в свободном потоке, создаваемые долгоживущими следами дефектов скорости. Сетка G9 изготовлена из лески с наименьшим (для данных экспериментальных условий) диаметром, при котором возникает турбулентность. В частности, поток хорошо турбулизуется при  $n = 160, 200, 240$  об/мин, в то время как при  $n = 120$  об/мин создаваемая турбулентность очень слабая и качественно отличается от турбулентности, создаваемой при других значениях скорости. При меньших скоростях потока ( $n < 100$  об/мин) поток, проходящий через данную сетку, остается ламинарным. Более подробное описание сеток приведено в работе [7].

Жесткие рамы турбулизирующих сеток были оснащены обтекателями [18], что препятствовало искажению основного потока и появлению дополнительных (неконтролируемых) возмущений.

Характеристики вихрей свободного потока, создаваемых используемыми сетками (G1 и G9), были измерены в проведенных ранее экспериментах, а также в экспериментах, описываемых в настоящей работе. Некоторые наиболее важные результаты этих измерений представлены в работе [7] и обсуждаются ниже.

Частотные спектры турбулентности свободного потока, создаваемой сетками G1 и G9, показаны на рис. 5. Спектры получены путем разбиения сигнала термоанемометра, регистрируемого в течение длительного времени, на перекрывающиеся участки (с перекрытием 60 %), каждый из которых взвешивался окном Кайзера — Бесселя с параметром  $\alpha = 2$ . Затем оценки, полученные для каждого участка, осреднялись. Потери энергии возмущений, обусловленные уменьшением амплитуды на краях каждого окна, компенсировались с помощью коэффициента некогерентного усиления окна. Спектры были получены при  $x_c = 158$  мм,  $n = 200$  об/мин (соответствующие значения скорости набегающего потока указаны в табл. 2). Спектры получены вне пограничного слоя при  $y = 30$  мм в диапазоне  $z = 20 \div 80$  мм (16 точек, расположенных на расстоянии 4 мм друг от друга) и осреднены для повышения точности оценок. Все спектры построены в логарифмическом масштабе. Спектральная плотность  $S$  пропорциональна квадрату амплитуд возмущений скорости (в долях средней скорости потока в точке измерения) и соответствует спектру мощности. Интегрирование этого спектра позволяет вычислить среднеквадратичную интенсивность

флуктуаций скорости набегающего потока, т. е. степень турбулентности (для продольной составляющей флуктуаций скорости).

На рис. 5 видно, что частотные спектры существенно различаются. Сетка G1 создает интенсивные возмущения скорости, которые обладают значительной энергией в диапазоне частот  $10 \div 3000$  Гц. Спектр, создаваемый сеткой G9, качественно подобен, но флуктуации скорости в нем имеют значительно более низкие уровни. Спектр, полученный в отсутствие сетки, имеет иную форму с меньшей интенсивностью флуктуаций во всем диапазоне частот, за исключением очень низких частот  $f < 10$  Гц. Низкочастотные флуктуации доминируют в спектре и слабо различаются во всех трех случаях. Эти флуктуации соответствуют низкочастотной модуляции скорости набегающего потока, характерной для всех аэродинамических труб, включая малотурбулентные. Эта модуляция обусловлена проблемой создания высокоточной системы регулирования скорости вращения вентилятора аэродинамической трубы с замкнутым контуром, обладающей обратной связью, а также, возможно, влиянием нестационарных низкочастотно пульсирующих локальных отрывных зон в контуре трубы, возникающих вследствие установки в ее рабочей части экспериментальной модели. (Острые пики на частотах, превышающих 4 кГц, представляют собой электрические помехи, обусловленные техническими ограничениями системы сбора и оцифровки данных.)

Эволюция спектров нестационарных вихрей, создаваемых сетками G1 и G9, была подробно исследована в проведенных ранее экспериментах. Обнаружены следующие особенности. Уменьшение вниз по потоку спектральных плотностей (нормированных на локальные скорости невязкого потока  $U_e$ ) в широком диапазоне частот (особенно на высоких частотах) наблюдается во всех изученных режимах с сетками. Наоборот, спектры естественных возмущений набегающего потока (случай G0) практически совпадают, при этом локальные спектральные плотности увеличиваются вниз по потоку. Заметим, что в случае, когда спектральные плотности нормированы на фиксированную среднюю скорость потока на границе пограничного слоя, измеренную в центре шероховатости  $U_{er}$ , они медленно убывают вниз по течению даже в случае низкого уровня турбулентности (т. е. при отсутствии сеток).

Зависимость спектров нестационарных вихрей от частоты вращения вентилятора аэродинамической трубы (т. е. от скорости набегающего потока) также была подробно исследована (см., например, [7]). Установлено, что эта зависимость является достаточно слабой. При высоких (более 500 Гц) частотах, а также при частотах, меньших 10 Гц, спектральные плотности увеличиваются с увеличением скорости свободного потока. Однако в интервале между двумя этими частотными диапазонами спектральная плотность уменьшается с увеличением скорости свободного потока. Единственным исключением, наблюдаемым для сетки G9 при наименьших изученных скоростях ( $n = 120$  об/мин), является существенное уменьшение интенсивности турбулентности при частотах выше 10 Гц при уменьшении скорости набегающего потока. Как отмечено выше, это явление обусловлено использованием сетки G9, имеющей наименьший из возможных диаметр проволоки (лески). Спектры, полученные в отсутствие сеток (G0), также слабо зависят от скорости набегающего потока, при этом происходит незначительный рост спектральных плотностей с увеличением скорости потока [7].

В работе [7] также показано, что сетки G1 и G9 создают слабые стационарные вихри в свободном потоке, проявляющиеся в виде чрезвычайно слабой модуляции средней скорости потока по размаху. Эти пространственные вариации средней по времени скорости набегающего потока, создаваемые сетками G1 и G9, было трудно измерить в экспериментах с использованием термоанемометра, поскольку они не превышают 0,5 % средней скорости. Между тем обычно погрешность измерений средней скорости потока термоанемометром

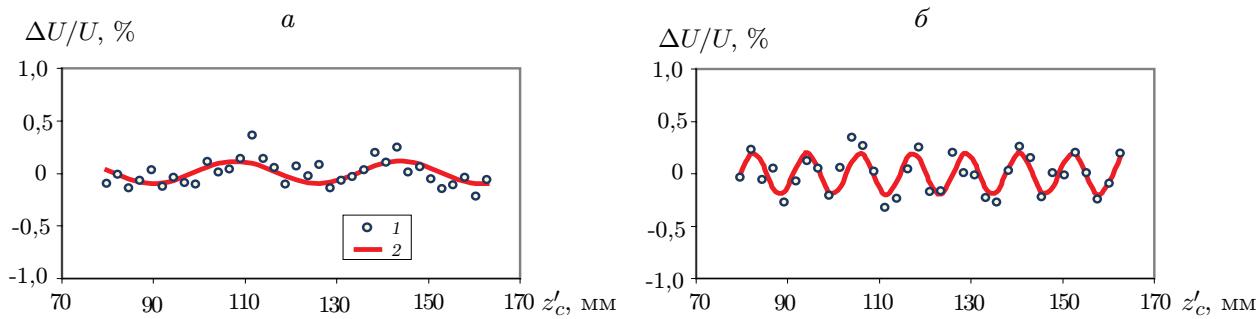


Рис. 6. Модуляция средней скорости потока по размаху, создаваемая сетками G1 (а) и G9 (б), при  $x_c = 230,5$  мм,  $n = 160$  об/мин:

1 — результаты измерения, 2 — аппроксимация экспериментальных данных с помощью функции косинуса

составляет приблизительно 1 %. Однако в настоящей работе, а также в экспериментах [7] результаты измерения термоанемометром были скорректированы с учетом низкочастотных вариаций скорости набегающего потока, которые одновременно регистрировались датчиком давления. Эта процедура позволила разделить изменения скорости, зависящие от времени, и изменения, связанные с перемещением датчика термоанемометра по размаху, в результате чего значительно увеличилась точность измерений средней скорости. Таким образом, была получена важная информация о чрезвычайно слабых пространственных модуляциях средней скорости потока, создаваемых используемыми сетками.

Модуляции средней скорости потока по размаху, создаваемые сетками G1 и G9, показаны на рис. 6 для скоростных режимов с частотой вращения вентилятора аэродинамической трубы  $n = 160$  об/мин. Измерения выполнены на большом расстоянии от стенки в свободном потоке. Для обеих сеток отчетливо видны вариации средней скорости потока по размаху, несмотря на то что они очень малы. Для сетки G1 (см. рис. 6, а) среднеквадратичная величина вариации средней скорости составляет приблизительно 0,06 %, в то время как для сетки G9 — 0,17 %. В работе [7] установлено, что модуляция средней скорости, создаваемая сетками, практически не зависит от частоты вращения вентилятора аэродинамической трубы. Обнаружено только одно исключение для сетки G9 — медленное уменьшение модуляции с уменьшением скорости потока и ее скачкообразный рост в режиме G9n120, в отличие от трех других скоростных режимов (G9n160, G9n200 и G9n240). Такие же результаты получены в настоящих экспериментах. Это объясняется особенностью сетки G9, которая создает слабую турбулентность при  $n = 120$  об/мин и не турбулизует поток при  $n \leq 100$  об/мин.

После обработки результатов измерений среднеквадратичные амплитуды стационарной, квазигармонической пространственной модуляции средней скорости потока  $\varepsilon_{sg}$  были оценены с использованием понятия стационарной степени турбулентности сетки [7]. Эти значения оказались равными значениям, указанным в табл. V в [7]. Наиболее важные характеристики сеток G1 и G9, использованных в настоящих экспериментах, указаны в табл. 6. Значения степени турбулентности  $\varepsilon_{7r}$  соответствуют диапазону частот 7 Гц  $\div$  10 кГц.

Результаты измерений показали, что каждый исследованный режим характеризуется двумя типами вихревых возмущений свободного потока, генерируемых сетками: флюктуациями скорости и пространственными вариациями средней скорости потока. Возмущения этих двух видов одинаково важны в условиях описываемых экспериментов, поскольку могут взаимодействовать с исследуемыми двумерными полосами шероховатости, возбуждая

Таблица 6

Стационарные  $\varepsilon_{sg}$  и нестационарные  $\varepsilon_{7r}$  степени турбулентности и масштабы стационарных возмущений по размаху  $\lambda'_{zg}$ , создаваемые сетками G1 и G9

Тип сетки	$\varepsilon_{sg}$ , %	$\varepsilon_{7r}$ , %	$\lambda'_{zg}$ , мм
G9n120	0,356	0,149	11,3
G9n160-240	0,169	0,274	11,3
G1	0,058	0,595	32,7

Причение. Результаты осреднены для всех соответствующих скоростей (за исключением режима G9n120).

существенно трехмерные нестационарные и стационарные моды неустойчивости поперечного течения. С учетом сказанного выше сценарии перехода для сеток G1 и G9 должны существенно различаться.

**4. Основные сценарии перехода, инициируемые сетками G1 и G9.** Ниже рассматриваются только те режимы, в которых наблюдался эволюционный тип перехода и в которых доминировали моды неустойчивости ПТ.

Сценарии эволюционного перехода, наблюдаемые в настоящих экспериментах, качественно подобны описанным в работах [7, 17, 18] для режимов с сетками G1 и G9. Их основные характеристики, измеренные в настоящих экспериментах в режимах W2H4G1n160 и W2H4G9n160 (см. табл. 1) представлены на рис. 7. Как и ранее, измерения внутри пограничного слоя выполнялись при постоянной (для каждого положения по хорде) координате  $y$  вблизи максимумов амплитуд возмущений, приблизительно соответствующих расстоянию от стенки, на котором  $U_{mean}/U_e \approx 0,7$  ( $U_{mean}$  — средняя по времени скорость потока, осредненная по размаху).

На рис. 7,а,г показаны изолинии в плоскости  $(x, z)$  стационарных возмущений скорости, развивающихся внутри пограничного слоя, на рис. 7,б,д — соответствующие изолинии среднеквадратичной интенсивности интегральных пульсаций скорости, на рис. 7,в,е — среднеквадратичная интенсивность высокочастотных пульсаций скорости, полученных путем фильтрации интегральных пульсаций в диапазоне высоких частот, соответствующих локальной высокочастотной вторичной неустойчивости пограничного слоя, искаженного первичными возмущениями. Таким образом, на рис. 7,а,б,г,д представлена общая эволюция полей возмущений в переходном процессе, на рис. 7,в,е — формы границы области начала турбулизации потока в плоскости  $(x, z)$ .

При использовании сетки G1 (см. рис. 7,а–в) реализуются режимы с повышенным уровнем турбулентности (изучавшиеся, в частности, в экспериментах [7, 17, 18, 26]) с преобладанием в пограничном слое бегущих мод неустойчивости ПТ. Аналогично случаям с низким уровнем турбулентности наблюдается локальная высокочастотная вторичная неустойчивость основного потока, возмущенного модами первичной неустойчивости ПТ, соответствующая началу перехода (началу турбулизации течения). Однако в этих случаях в частотных спектрах отсутствуют отчетливо выраженные пики вторичной неустойчивости. Возникновение этой неустойчивости наблюдается на осцилограммах пульсаций скорости, на которых появляются высокочастотные всплески, а затем возникают области перемежаемости. Турбулентные клинья в потоке отсутствуют, а изолинии амплитуд возмущений достаточно однородны по размаху. Соответственно, перемежаемость появляется почти одновременно практически по всему размаху крыла.

При использовании сетки G9 (см. рис. 7,г–е) наблюдаемые сценарии эволюционного перехода соответствуют низкому уровню турбулентности (см. [7, 17, 18, 26]), в ко-

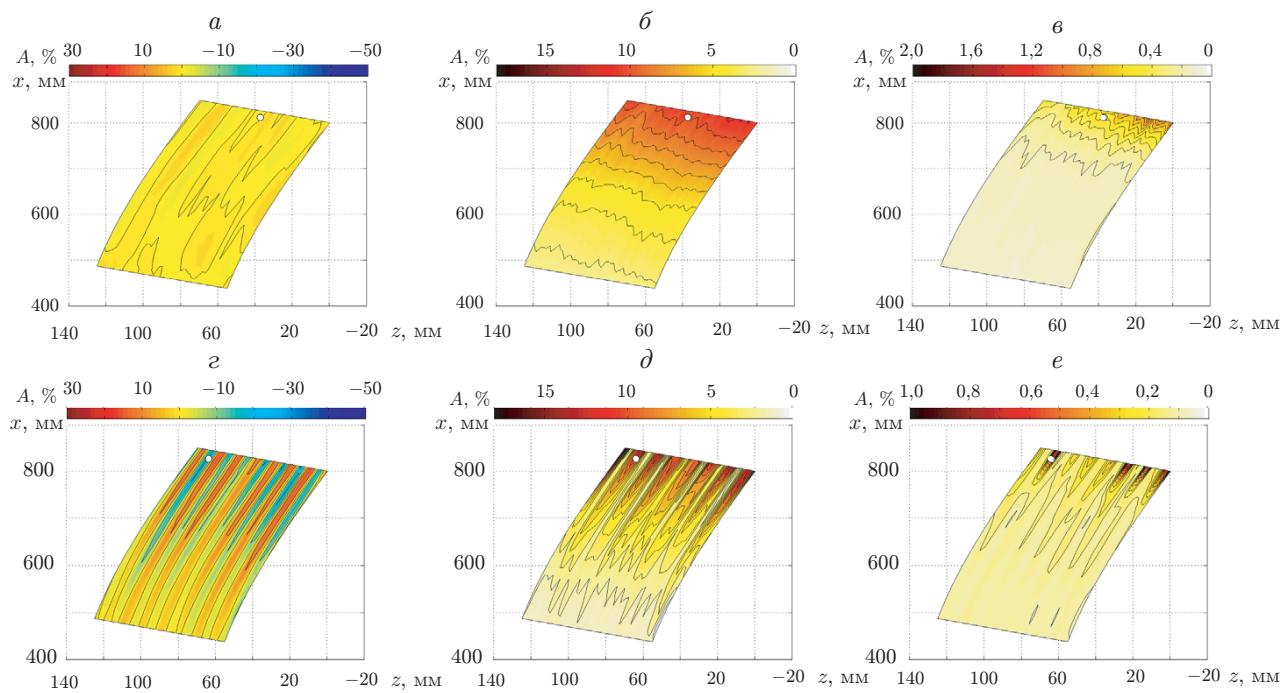


Рис. 7. Изолинии амплитуд стационарных (*а, г*) и нестационарных (*б, д*) возмущений, а также интенсивность высокочастотных вторичных возмущений (*в, е*): *а-е* — режим W2H4G1n160 ( $C_0 = 14,36 \text{ м/с}$ ), *г-е* — режим W2H4G9n160 ( $C_0 = 15,58 \text{ м/с}$ ); *а* —  $A_{\min} = -3 \%$ ,  $A_{\max} = 3 \%$ , *б* —  $A_{\min} = 0$ ,  $A_{\max} = 11 \%$ , *в* —  $A_{\min} = 0$ ,  $A_{\max} = 1,07 \%$ , *г* —  $f = 500 \div 7000 \text{ Гц}$ , *з* —  $A_{\min} = -23 \%$ ,  $A_{\max} = 16 \%$ , *д* —  $A_{\min} = 0$ ,  $A_{\max} = 17 \%$ , *е* —  $A_{\min} = 0$ ,  $A_{\max} = 0,74 \%$ , *г* —  $f = 500 \div 7000 \text{ Гц}$ ; точки — точки начала турбулизации потока, в которых проявляется локальная высокочастотная вторичная неустойчивость

торой преобладают стационарные моды неустойчивости ПТ. Стационарные вихри ПТ наблюдаются в пограничном слое (см. рис. 7,*г*) в виде продольных полос с регулярной периодичностью по размаху, период которой соответствует длине волны стационарных неоднородностей набегающего потока, создаваемых сеткой G9. Поле пульсаций скорости потока (см. рис. 7,*д*) также существенно трехмерное и создано стационарными вихрями неустойчивости ПТ. Максимумы амплитуды возмущений расположены вблизи минимумов полос, ассоциируемых со стационарными модами неустойчивости ПТ. Граница перехода (см. рис. 7,*е*) сильно изрезана и имеет вид турбулентных клиньев, возникающих порознь, но сливающихся друг с другом ниже по течению. В частотных спектрах имеется несколько отчетливо выраженных пиков локальной высокочастотной вторичной неустойчивости, возникающих в определенных частотных диапазонах, положение которых зависит от скорости свободного потока. В отличие от случаев низкого уровня турбулентности (т. е. в отсутствие сеток) высокочастотные всплески, наблюдающиеся при наличии сетки G9, сильно модулированы во времени вследствие “дрожания” турбулентных клиньев.

**5. Характеристика возмущений пограничного слоя до начала процесса турбулизации.** Ниже описаны пространственные распределения амплитуд стационарных и бегущих возмущений пограничного слоя, наблюдавшихся в исследуемых режимах, при различных комбинациях параметров основного потока и возмущений.

Стационарные возмущения характеризуются величиной модуляции средней скорости потока в направлении размаха  $\Delta U(z') = U(z') - \text{mean}\{U(z')\}$ , нормированной на локаль-

ную скорость течения на границе пограничного слоя  $U_e$ , а бегущие волны характеризуются среднеквадратичной амплитудой  $u'(z')$  пульсаций скорости, нормированной аналогичным образом. Эти две характеристики определяются в долях величины  $U_e$ .

Представленные ниже распределения по размаху были построены на линии с координатой  $x'$ , которая находится на расстоянии, равном 0,9 расстояния от передней кромки полосы шероховатости до точки перехода, положение которой соответствует началу турбулизации потока, описываемой с помощью механизма локальной высокочастотной вторичной неустойчивости. Расстояние от стенки  $y$  было постоянным для каждого распределения по размаху и соответствовало в среднем (по оси  $z'$ ) средней скорости  $U/U_e \approx 0,7$ . Как было показано в проведенных ранее исследованиях, это расстояние соответствует положению максимумов на профилях амплитуд стационарных и бегущих возмущений по нормали к стенке, наблюдаемых в пограничных слоях скользящих крыльев, когда переход обусловлен неустойчивостью поперечного течения.

*5.1. Влияние высоты и ширины полосы на возмущения до начала турбулизации при использовании сетки G1.* Так же, как и в некоторых проведенных ранее экспериментах (см. [7, 17, 18, 26]), обнаружено, что интенсивность пульсаций скорости пограничного слоя достаточно высока во всех переходных режимах с повышенными степенями турбулентности свободного потока, возбуждаемыми сетками G1 и G9. Однако роль стационарных и бегущих мод в разных режимах существенно различалась. Как отмечено выше, бегущие волны ПТ были преобладающими в пограничном слое в режимах с сеткой G1, а стационарные вихри ПТ были очень слабыми. Однако в режимах с сеткой G9 ситуация была практически противоположной. Создаваемая этой сеткой слабая модуляция средней скорости набегающего потока по размаху приводила к возникновению интенсивных стационарных вихрей ПТ. К тому же в случае сетки G9 поперечные масштабы данных вихрей оказались близки к масштабам наиболее быстро растущих мод неустойчивости ПТ. Интенсивные стационарные вихри ПТ оказывают существенное влияние на переходный процесс, несмотря на то что бегущие возмущения имеют большие амплитуды в этих режимах.

Влияние высоты элемента шероховатости на распределение амплитуды возмущений по размаху, измеренных непосредственно перед точкой начала турбулизации при наличии сетки G1, т. е. в случае усиленных нестационарных вихрей свободного потока, показано на рис. 8. Заметим, что распределения, представленные на рис. 8 (а также на рис. 9), приведены со смещением по оси  $z'$ , что позволяет учесть различие их положений по хорде, обусловленное сдвигами (в большинстве случаев малыми) точек начала турбулизации, наблюдаемыми в различных режимах.

На рис. 8 видно, что в диапазоне параметров, в котором сценарий перехода остается эволюционным, наличие полос шероховатости поверхности не влияет на распределения по размаху амплитуд как стационарных, так и нестационарных возмущений. Для сетки G1 такой же результат наблюдается при  $n = 160$  об/мин для полос шероховатости с размерами от W1H1 до W1H4 и при  $n = 200, 240$  об/мин для полос шероховатости с размерами от W1H1 до W1H3.

Однако ситуация существенно меняется, когда сценарий эволюционного перехода сменяется сценарием нестационарного внезапного перехода (режимы W1H5G1n160, W1H4G1n200, W1H5G9n160, W1PH5G1n200 в табл. 1). Для случаев повышенной степени турбулентности (при использовании сетки G1) и для ширины полосы шероховатости W1 ( $l'_r = 50$  мм) такая смена сценария происходит, например, при переходе от режима W1H4G1n160 к режиму W1H5G1n160 при увеличении высоты элемента шероховатости и при переходе от режима W1H4G1n160 к режиму W1H4G1n200 при увеличении скорости набегающего потока. После пересечения границы между сценариями эволюционного и нестационарного внезапного переходов модуляция средней скорости по размаху (очень

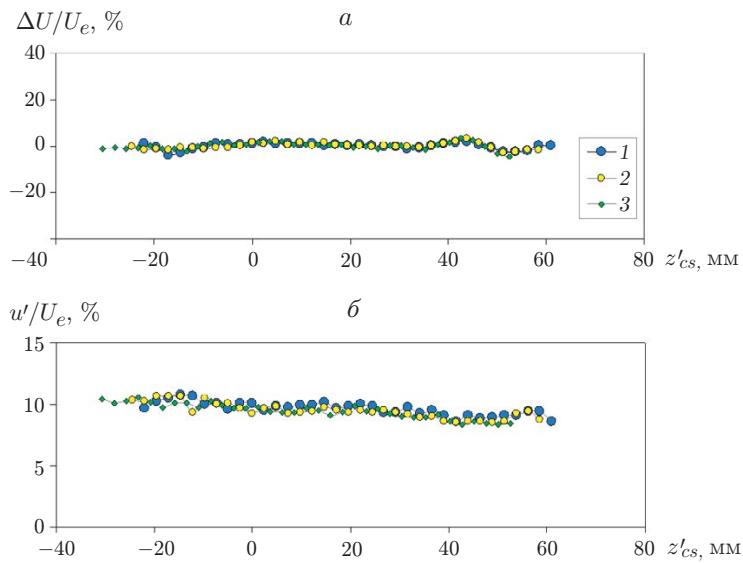


Рис. 8. Распределения по размаху амплитуд стационарных (*а*) и нестационарных (*б*) возмущений пограничного слоя, измеренных до начала процесса турбулизации течения в режимах W0H0G1n120 (1), W1H3G1n120 (2) и W1H5G1n120 (3)

малая при наличии сетки G1) остается практически неизменной, в то время как интенсивность пульсаций скорости до начала процесса турбулизации резко уменьшается. Это обусловлено значительным смещением точки начала турбулизации вверх по течению. В результате амплитуды возмущений, развивающихся вниз по течению, остаются небольшими в этой точке, в то время как переход инициируется всплесками флюктуаций скорости, спорадически генерируемыми полосой шероховатости (несмотря на то что начальная величина этих всплесков в данном случае очень мала, поскольку они находятся на стадии зарождения).

Следует отметить, что влияние полос шероховатости может проявляться только при их очень больших высотах, превышающих  $80 \div 100\%$  толщины вытеснения пограничного слоя (на передней кромке полос шероховатости). Число Рейнольдса, вычисленное по высоте элемента шероховатости, в этом случае приближенно равно 450. (В то же время в некоторых режимах переход может оставаться эволюционным даже при значительно большей высоте элемента шероховатости.)

Аналогичные результаты были получены для задачи о влиянии ширины полосы шероховатости на распределения по размаху амплитуд стационарных и бегущих возмущений, измеренных непосредственно перед точкой начала турбулизации, при наличии сетки G1. Установлено, что ширина шероховатости по хорде не оказывает существенного влияния на амплитуду возмущений во всех изученных случаях, если сохраняется сценарий эволюционного перехода. Кроме того, обнаружено, что сглаживание задней кромки полосы шероховатости с помощью пластилина также практически не влияет на распределения по размаху амплитуды, измеренной до начала турбулизации.

Междуд тем ситуация вновь существенно меняется в режимах, соответствующих границе между сценариями эволюционного и нестационарного внезапного переходов либо между сценариями нестационарного внезапного и внезапного переходов. При  $n = 200$  об/мин для сетки G1 переход от широкой полосы шероховатости W2H4 ( $l'_r = 150$  мм) к узкой полосе W1H4 ( $l'_r = 50$  мм) приводит к скачкообразной смене сценария эволюционного пе-

рехода, наблюдаемого в режиме W2H4G1n200 (вблизи границы области режима эволюционного перехода) к сценарию нестационарного внезапного перехода, наблюдаемому в режиме W1H4G1n200. Скачкообразная смена сценария приводит к значительному уменьшению амплитуд бегущей волны до начала турбулизации, однако распределения, полученные для стационарных возмущений, остаются неизменными.

Наиболее вероятной причиной влияния ширины полосы шероховатости на амплитуду возмущений, по-видимому, является воздействие задней кромки полосы (уступа), которая в случае узкой полосы находится ближе к передней кромке экспериментальной модели, где толщина пограничного слоя меньше. Эта гипотеза была проверена и доказана в эксперименте со сглаженным уступом на задней кромке полосы шероховатости при ширине шероховатости W1 и максимальной высоте H5. Установлено, что при использовании сетки G1 и  $n = 160$  об/мин замена полосы шероховатости W2H5 на полосу шероховатости W1H5 оказывает существенное влияние на распределение амплитуды бегущей волны по размаху, что приводит к ее уменьшению (вследствие быстрого смещения положения перехода вверх по течению). Это обусловлено сменой сценария эволюционного перехода, наблюдавшегося в режиме W2H5G1n160, на сценарий нестационарного внезапного перехода, наблюдавшийся в режиме W1H5G1n160. Однако сглаживание задней кромки полосы шероховатости (уступа), выполненное в режиме W1PH5G1n120, не приводит к уменьшению амплитуды волны.

При еще большей скорости свободного потока (при  $n = 200$  об/мин) сглаживание задней кромки полосы шероховатости при наличии сетки G1 приводит к смене очень “жесткого” сценария внезапного перехода (в режиме W1H5G1n200) на более “мягкий” сценарий нестационарного внезапного перехода (в режиме W1PH5G1n200).

*5.2. Влияние высоты и ширины полосы на возмущения до начала турбулизации при использовании сетки G9.* Ниже вновь рассматриваются режимы, в которых сценарий перехода является эволюционным. На рис. 9 показаны распределения амплитуд стационарных и нестационарных возмущений пограничного слоя по длине волны, измеренные до начала турбулизации течения в режимах W0H0G9n120, W1H3G9n120 и W1H5G9n120. Видно,

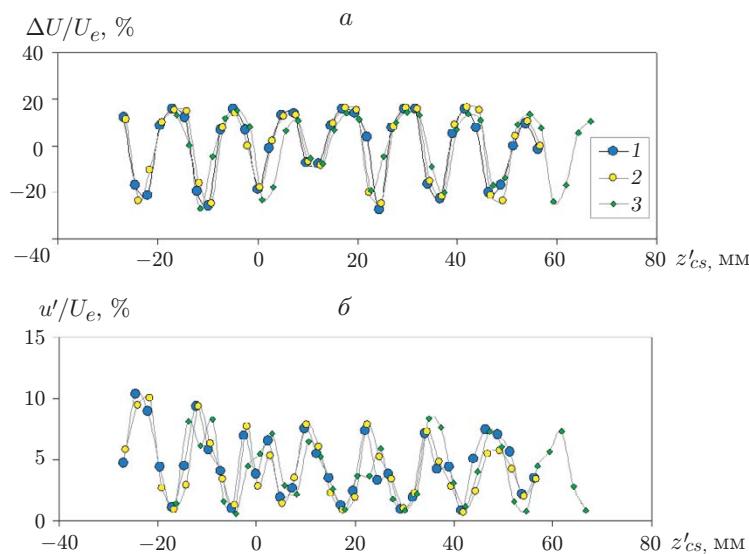


Рис. 9. Распределения по размаху амплитуд стационарных (a) и нестационарных (б) возмущений пограничного слоя, измеренных до начала турбулизации течения в режимах W0H0G9n120 (1), W1H3G9n120 (2) и W1H5G9n120 (3)

что воздействие полос шероховатости, наблюдаемое в случае интенсивных стационарных вихрей в свободном потоке, создаваемых сеткой G9, аналогично воздействию полос шероховатости в случае нестационарных вихрей, создаваемых сеткой G1. Действительно, в случае сетки G1 полосы шероховатости поверхности практически не влияют на распределение по размаху как стационарных, так и бегущих возмущений в диапазоне параметров, в котором сценарий перехода остается эволюционным. Для сетки G9 этот результат наблюдается также при  $n = 160$  об/мин для полос шероховатости с размерами от W1H1 до W1H4, а при  $n = 200, 240$  об/мин для полос шероховатости с размерами от W1H1 до W1H3. Для сетки G9 и  $n = 120$  об/мин влияние полосы шероховатости поверхности практически отсутствует при всех исследованных высотах (от W1H1 до W1H5).

Аналогично рассмотренным выше случаям для сетки G1 в случае использования сетки G9 ситуация существенно меняется при смене сценария эволюционного перехода на сценарий нестационарного внезапного перехода (режимы W1H5G1n160, W1H4G1n200, W1H5G9n160, W1PH5G1n200 в табл. 1). В случае большой интенсивности стационарных вихрей набегающего потока (при использовании сетки G9) и при ширине полосы шероховатости W1 ( $l'_r = 50$  мм) такое изменение происходит при переходе от режима W1H4G9n160 к режиму W1H5G9n160 при увеличении высоты полосы, а также при переходе от режима W1H5G9n120 к режиму W1H5G9n160 при увеличении скорости набегающего потока. При смене сценария эволюционного перехода на нестационарный внезапный переход модуляция средней скорости по размаху и интенсивность флуктуаций скорости, измеренные до начала процесса турбулизации, резко уменьшаются. Так же как в случае сетки G1, это происходит вследствие значительного смещения точки перехода вверх по потоку. В результате амплитуды возмущений, развивающихся вниз по потоку, остаются малыми в этой точке, а переход инициируется ростом пульсаций скорости, спорадически генерируемых полосой шероховатости.

Влияние полос шероховатости вновь появляется только при их очень больших высотах, пороговые значения которых близки к соответствующим значениям в случае использования сетки G1. Однако имеется незначительное различие: в рассматриваемых случаях преобладания стационарных вихрей в свободном потоке нестационарный внезапный переход, имевший место для сетки G1 в режиме W1H4G1n200, не наблюдается для сетки G9 в соответствующем режиме W1H4G9n200, несмотря на то что в последнем случае сценарий перехода очень близок к сценарию нестационарного внезапного перехода (см. табл. 1). В отличие от случая использования сетки G1 в случае использования сетки G9 переход от  $n = 160$  об/мин к  $n = 200$  об/мин для полосы шероховатости W1H4 не приводит к существенному изменению распределений по размаху амплитуд как стационарных, так и нестационарных возмущений.

Подобные результаты были получены при исследовании влияния ширины полосы шероховатости по хорде на распределения по размаху амплитуд стационарных и бегущих возмущений, измеренных до начала процесса турбулизации потока, при наличии сетки G9. Так же как в случае использования сетки G1, все результаты, полученные для сетки G9, свидетельствуют об очень слабом влиянии ширины шероховатости по хорде на амплитуды стационарных и бегущих возмущений, а также на характер соответствующих распределений их амплитуд по размаху.

Как и в случае использования сетки G1, данное явление наблюдается только для сценариев эволюционного перехода. Между тем ситуация вновь меняется в режимах, соответствующих смене сценария эволюционного перехода на сценарий нестационарного внезапного перехода. Из табл. 1 следует, что при  $n = 160$  об/мин для сетки G9 замена широкой полосы шероховатости W2H5 ( $l'_r = 150$  мм) на узкую полосу W1H5 ( $l'_r = 50$  мм) приводит к смене сценария эволюционного перехода, наблюдаемого в режиме W2H5G9n160, на сце-

нарий нестационарного внезапного перехода, наблюдаемый в режиме W1H5G9n160. Это вызывает значительное уменьшение (в точке, соответствующей началу турбулизации) амплитуд как стационарных, так и бегущих возмущений.

Так же как в случаях режимов с повышенными степенями турбулентности (создаваемой сеткой G1), наиболее вероятной причиной воздействия ширины полосы шероховатости на амплитуду возмущений, наблюдаемого в случаях усиленных стационарных вихрей в свободном потоке (создаваемых сеткой G9), является влияние задней кромки полосы, которая находится ближе к передней кромке экспериментальной модели в случае узкой полосы W1H5. Поскольку толщина пограничного слоя меньше вблизи передней кромки скользящей пластины, безразмерная высота уступа больше вблизи задней кромки узкой полосы W1H5.

Заметим, что в некоторых режимах, которые близки к области сценария эволюционного перехода, например, в режимах W2H4G9n200 и W1H4G9n200 (см. табл. 1), ширина полосы шероховатости практически не оказывает влияния на распределения по размаху амплитуд стационарных и нестационарных возмущений пограничного слоя.

Таким образом, на основе результатов проведенного выше анализа можно сделать следующие выводы: 1) в режимах со сценариями эволюционного перехода (как с усиленными стационарными возмущениями (сетка G9), так и с преобладающими бегущими возмущениями (сетка G1)) двумерные полосы шероховатости поверхности либо не влияют на амплитуду возмущений пограничного слоя, измеренную непосредственно до начала турбулизации потока, либо влияют очень слабо; 2) значительное влияние полос наблюдается только в том случае, когда исследуемые сценарии перехода близки к границе между сценариями эволюционного и нестационарного внезапного (или внезапного) перехода; 3) в указанных случаях близость задней кромки полосы шероховатости к передней кромке скользящей пластины, так же как и сглаженность уступа в конце полосы шероховатости, может оказывать существенное влияние на поля возмущений; 4) в случае, когда сценарии перехода являются эволюционными, положение задней кромки полосы шероховатости и ее гладкость не влияют на структуру возмущений пограничного слоя до начала турбулизации течения.

**6. Влияние двумерных элементов шероховатости на положение перехода.** Ниже рассматриваются параметры течения, влияющие на положение ламинарно-турбулентного перехода.

6.1. *Граница сценария внезапного перехода.* На основе полученных результатов можно определить параметры возмущения (вид сетки,  $H/\delta_{1rb}$  и  $Re_{hrb}$ ), при которых происходит смена сценария эволюционного перехода на сценарий внезапного перехода (стационарного или нестационарного).

Следует отметить, что в пределах погрешности проведенных измерений (обусловленной большим шагом изменения высоты элемента шероховатости) не обнаружено существенной зависимости положения этой границы от вида используемых сеток (G1 или G9). Это утверждение верно при  $n = 160 \div 240$  об/мин, поскольку при  $n = 120$  об/мин сценарий внезапного перехода отсутствовал. Поэтому отмеченная выше особенность сетки G9 при  $n = 120$  об/мин не оказывала влияния на результаты измерений параметров, при которых происходит смена сценария эволюционного перехода на сценарий внезапного перехода.

Обнаружено, что переход остается эволюционным, если безразмерная высота элемента шероховатости  $H/\delta_{1rb}$  не превышает 146 % для узких полос шероховатости (W1), и может стать внезапным, если безразмерная высота элемента шероховатости  $H/\delta_{1rb}$  достигнет значения, равного 162 %. В случае широких полос шероховатости (W2) или узких полос со сглаженными задними кромками (W1P) сценарий перехода может оставаться эволюционным при значениях  $H/\delta_{1rb} \leq 192$  %.

Для числа Рейнольдса  $Re_{hrb}$ , определенного по высоте элемента шероховатости, получены следующие результаты. Обнаружено, что для узких полос шероховатости (W1) сценарий перехода остается эволюционным, если число Рейнольдса  $Re_{hrb} \leq 806$ , и может стать внезапным при  $Re_{hrb} = 957$ . Для широких полос шероховатости (W2) или для узких полос со сглаженными задними кромками (W1P) сценарий эволюционного перехода может не меняться при  $Re_{hrb} \leq 1061$ .

**6.2. Положения перехода при доминировании нестационарных возмущений потока (сетка G1).** Целью настоящей работы является изучение влияния двумерных полос шероховатости на положение перехода для двух видов возмущений скорости набегающего потока: с преобладанием нестационарных пульсаций скорости (сетка G1) и при повышенных возмущениях средней скорости набегающего потока (сетка G9). Ниже рассматриваются случаи перехода при наличии интенсивных нестационарных возмущений набегающего потока. Следует отметить, что здесь и ниже положению перехода к турбулентности соответствует точка начала турбулизации течения в результате возникновения локальной высокочастотной вторичной неустойчивости течения, несмотря на то что процесс перехода начинается, вообще говоря, в окрестности передней кромки модели, где формируется пограничный слой и возникают возмущения пограничного слоя.

Положение перехода характеризуется следующими параметрами:  $x'_{tr}$  — координата по хорде положения начала перехода (полученная на основе критерия появления локальной высокочастотной вторичной неустойчивости);  $Re'_{tr} = U_{erb}x'_{tr}/\nu = x'_{tr} Re_{1rb}$  — число Рейнольдса, соответствующее началу перехода и вычисленное по скорости невязкого потока на границе пограничного слоя в начале полосы шероховатости и по координате точки начала перехода  $x'_{tr}$ ;  $Re'_{2tr} = U_{erb}x'_{2tr}/\nu = x'_{2tr} Re_{1rb}$  — число Рейнольдса, соответствующее началу перехода и вычисленное по координате начала перехода, отсчитываемой от передней кромки полосы шероховатости:  $x'_{2tr} \equiv x'_{tr} - x'_{rb}$ .

На рис. 10 показаны зависимости координаты точек перехода  $x'_{tr}$  и соответствующих чисел Рейнольдса  $Re'_{tr}$  и  $Re'_{2tr}$  от безразмерной высоты элемента шероховатости  $H/\delta_{1rb}$ , полученные для различных значений скорости набегающего потока при повышенной степени турбулентности (сетка G1) и ширине полосы шероховатости по хорде  $l'_r = 50$  мм (W1). Видно, что увеличение скорости (т. е. числа оборотов вентилятора аэродинамической трубы  $n$ ) приводит к значительному смещению вверх по потоку координаты  $x'_{tr}$  начала перехода (см. рис. 10, a). При  $n = 120$  об/мин переход остается эволюционным для всех высот полосы шероховатости, что свидетельствует об отсутствии влияния двумерной шероховатости до высоты Н4 включительно. На высоте Н5 наблюдается незначительное смещение положения перехода вверх по потоку. Сглаживание задней кромки полосы шероховатости (в режиме W1PG1n120) не приводит к каким-либо существенным изменениям.

При  $n = 160$  об/мин и высоте полосы шероховатости не более Н4 также отсутствует зависимость координаты точки перехода от безразмерной высоты шероховатости. Однако при высоте Н5 сценарий перехода меняется на сценарий нестационарного внезапного перехода, положение которого резко смещается вверх по потоку. Сглаживание задней кромки полосы шероховатости пластилином (режим W1PG1n160) приводит к обратному скачку (точка 3 на рис. 10) к сценарию эволюционного перехода и к координате точки перехода, которая незначительно меньше, чем при всех других высотах шероховатости ( $n = 160$  об/мин), а также при отсутствии полос шероховатости.

При еще более высокой скорости свободного потока ( $n = 200$  об/мин) положение перехода остается неизменным при всех исследованных значениях высоты полосы шероховатости вплоть до Н3. На высоте Н4 сценарий эволюционного перехода сменяется на сценарий нестационарного внезапного перехода (с большим уменьшением  $x'_{tr}$ ), который на высоте Н5 переходит в сценарий внезапного перехода (см. рис. 10, a). Сглаживание задней

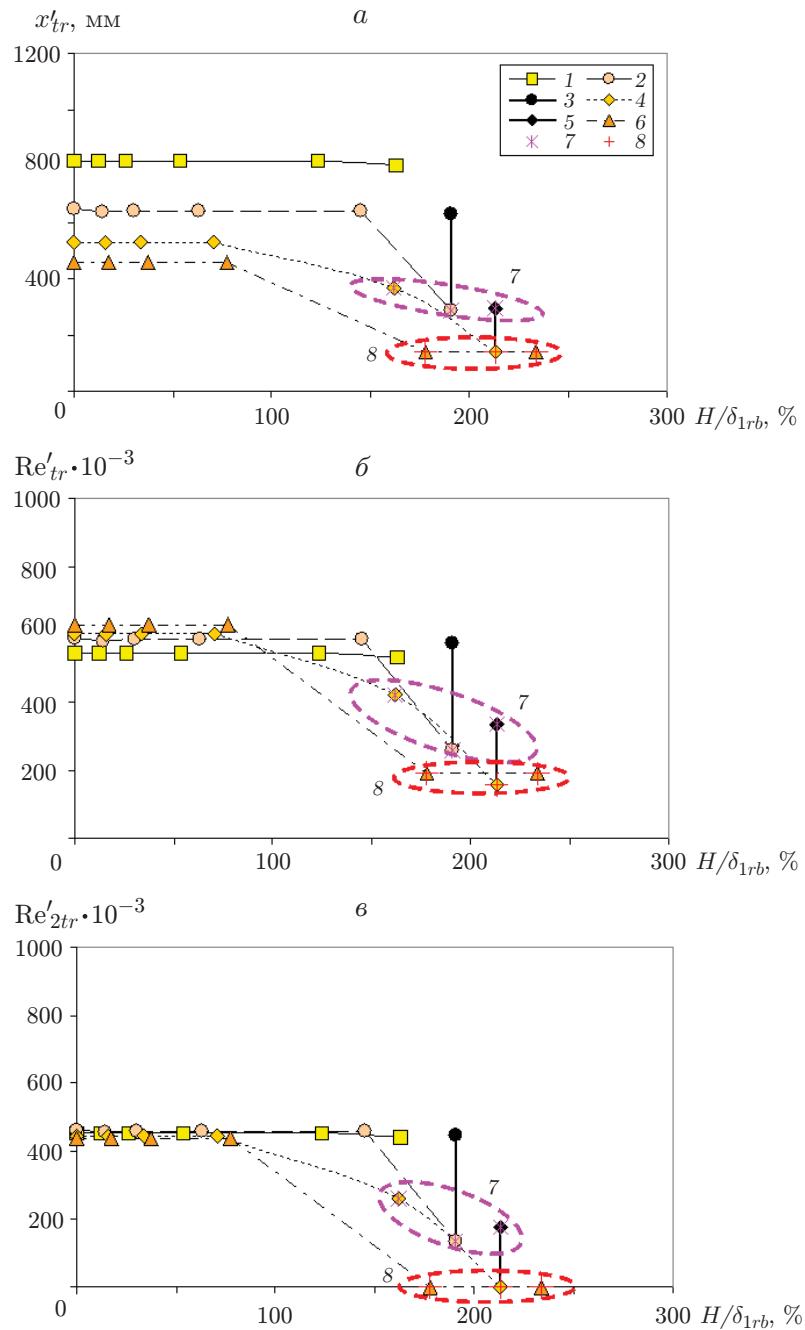


Рис. 10. Зависимости координаты точки перехода  $x'_{tr}$  (*a*) и чисел Рейнольдса  $\text{Re}'_{tr}$  (*b*) и  $\text{Re}'_{2tr}$  (*c*) от безразмерной высоты шероховатости  $H/\delta_{1rb}$ , полученные для различных значений скорости набегающего потока при повышенной степени турбулентности (сетка G1) и ширине полосы шероховатости  $l'_r = 50$  мм (W1): 1 — режим W1G1n120, 2 — режим W1G1n160, 3 — скачок в режим W1PG1n160, 4 — режим W1G1n200, 5 — скачок в режим W1PG1n200, 6 — режим W1G1n240, 7 — нестационарный режим внезапного перехода, 8 — режим внезапного перехода

кромки полосы шероховатости (режим W1PG1n200) приводит к смене этого сценария на сценарий нестационарного внезапного перехода со значительно большей координатой перехода  $x'_{tr}$ , которая, однако, существенно меньше наблюдаемой при всех других высотах шероховатости (при  $n = 200$  об/мин), включая высоту Н4.

Наконец, при  $n = 240$  об/мин положение перехода также остается постоянным до высоты полосы шероховатости Н3, но затем (при высоте Н4) меняется (пропуская сценарий нестационарного внезапного перехода) на положение, соответствующее сценарию внезапного перехода. В этом случае сглаживание задней кромки полосы шероховатости (режим W1PG1n240) не устраняет сценарий внезапного перехода.

Качественно подобные зависимости получены для чисел Рейнольдса  $Re'_{tr}$  и  $Re'_{2tr}$  (см. рис. 10, б, в). Единственное существенное различие связано с зависимостью положения перехода от скорости свободного потока. Для сценария эволюционного перехода числа Рейнольдса  $Re'_{tr}$  (см. рис. 10, б) увеличиваются с увеличением числа оборотов вентилятора аэродинамической трубы  $n$  (в отличие от координаты перехода  $x'_{tr}$ ). Более того, числа Рейнольдса  $Re'_{2tr}$  (см. рис. 10, в) остаются постоянными в эволюционных переходных режимах при всех изученных значениях скорости свободного потока ( $n = 120 \div 240$  об/мин). Также из рис. 10, в следует, что сглаживание задней кромки полосы шероховатости, выполненное в режиме W1PG1n160, дает значение числа Рейнольдса  $Re'_{2tr}$ , характерное для сценария эволюционного перехода.

**6.3. Положения перехода при повышенных стационарных возмущениях потока (сетка G9).** Рассмотрим результаты, полученные в режимах с усиленными стационарными возмущениями свободного потока, создаваемыми сеткой G9.

На рис. 11 показаны зависимости координаты точек перехода  $x'_{tr}$  и чисел Рейнольдса  $Re'_{tr}$  и  $Re'_{2tr}$  от безразмерной высоты полосы шероховатости  $H/\delta_{1rb}$ , полученные при различных значениях скорости свободного потока для повышенных амплитуд стационарных вихрей набегающего потока (сетка G9) при ширине полосы по хорде (W1), равной  $l'_r = 50$  мм. Заметим, что в отличие от случаев, в которых использовалась сетка G1, измерения для высот шероховатости Н1 и Н2 при наличии сетки G9 не выполнялись вследствие отсутствия воздействия таких малых высот на положение перехода.

На рис. 11 видно, что, как и в случае использования сетки G1, увеличение скорости (числа оборотов вентилятора  $n$ ) приводит к значительному смещению вверх по потоку координаты  $x'_{tr}$  начала перехода (см. рис. 11, а). При  $n = 120$  об/мин переход остается эволюционным для всех высот полосы шероховатости, что соответствует слабому влиянию двумерной шероховатости при всех исследованных значениях высоты.

При  $n = 160$  об/мин отсутствует зависимость координаты точки перехода от безразмерной высоты шероховатости до значения высоты Н4 включительно, однако на высоте Н5 сценарий перехода меняется на сценарий нестационарного внезапного перехода, положение которого скачкообразно смещается вверх по потоку. При  $n = 200$  об/мин переход остается эволюционным, координата точки перехода не меняется вплоть до высоты полосы шероховатости Н4 (в отличие от случая использования сетки G1, в котором на высоте Н4 сценарий перехода скачкообразно меняется на сценарий нестационарного внезапного перехода). На высоте Н5 сценарий эволюционного перехода меняется на сценарий внезапного перехода (с существенным уменьшением величины  $x'_{tr}$ ), пропуская сценарий нестационарного внезапного перехода. При наибольшей скорости свободного потока (при  $n = 240$  об/мин) зависимость положения перехода от высоты элемента шероховатости такая же, как в случае использования сетки G1. Величина  $x'_{tr}$  остается неизменной при высоте элемента шероховатости, меньшей Н3, а затем сценарий эволюционного перехода скачкообразно меняется на сценарий внезапного перехода (вновь пропуская сценарий нестационарного внезапного перехода) и далее не меняется.

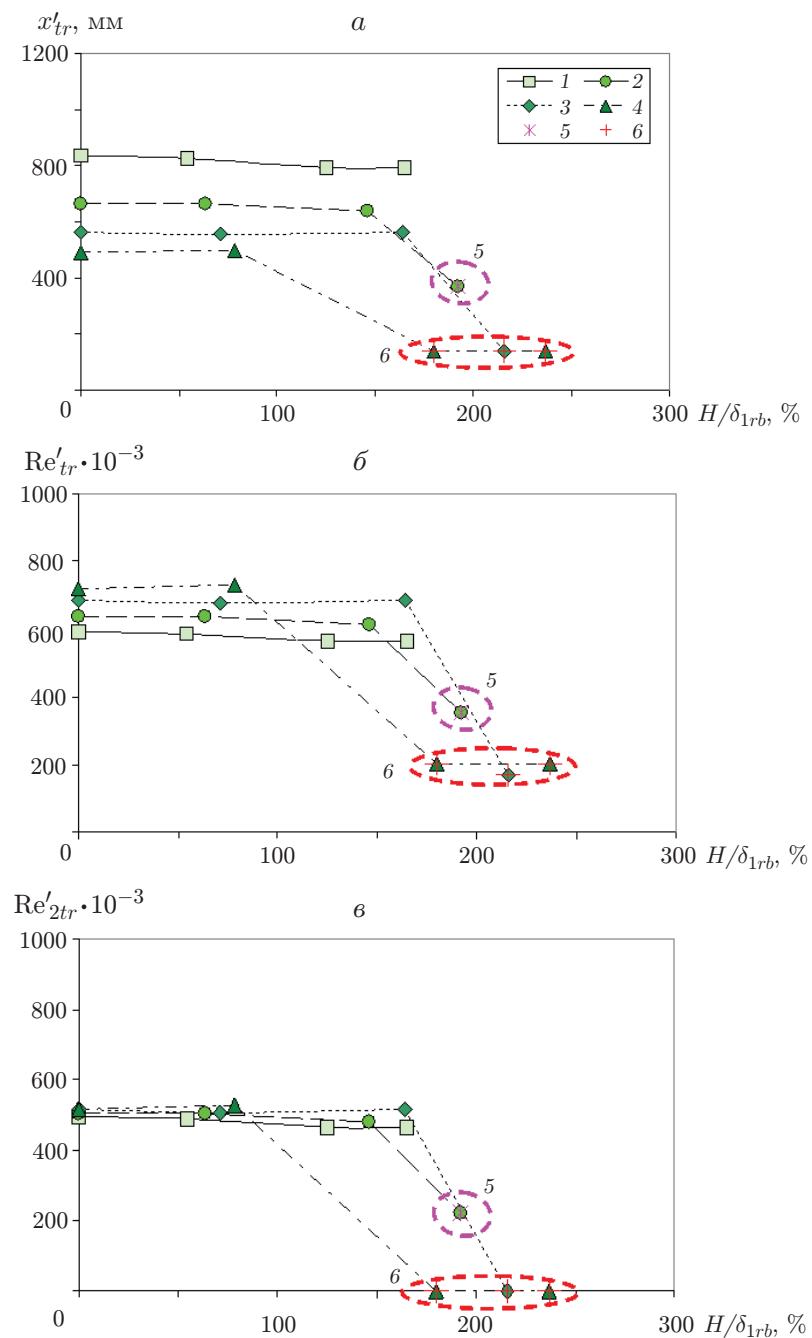


Рис. 11. Зависимости координаты точки перехода  $x'_{tr}$  (а) и чисел Рейнольдса  $\text{Re}'_{tr}$  (б) и  $\text{Re}'_{2tr}$  (в) от безразмерной высоты шероховатости  $H/\delta_{1rb}$ , полученные для различных значений скорости набегающего потока при повышенной амплитуде стационарных возмущений (сетка G9) и ширине полосы шероховатости  $l'_r = 50$  мм (W1):

1 — режим W1G9n120, 2 — режим W1G9n160, 3 — режим W1G9n200, 4 — режим W1G9n240, 5 — режим нестационарного внезапного перехода, 6 — режимы внезапного перехода

Подобные результаты наблюдаются для чисел Рейнольдса  $Re'_{tr}$  и  $Re'_{2tr}$  (см. рис. 11,*b, в*). Аналогично случаю использования сетки G1 единственное существенное различие связано с зависимостью положения перехода от скорости набегающего потока. Для сценария эволюционного перехода числа Рейнольдса  $Re'_{tr}$  (см. рис. 11,*b*) возрастают с увеличением  $n$  (в отличие от координаты перехода  $x'_{tr}$ ), в то время как числа Рейнольдса  $Re'_{2tr}$  (см. рис. 11,*в*) являются постоянными при всех изученных значениях скорости набегающего потока (при  $n = 120 \div 240$  об/мин).

Таким образом, на основе приведенных выше результатов можно сделать вывод, что двумерные полосы шероховатости практически не влияют на положение перехода, в случае если сценарий перехода остается эволюционным. В противном случае наличие полос большой высоты может привести к смене сценария эволюционного перехода на сценарий нестационарного внезапного либо внезапного перехода. Сглаживание задней кромки полосы шероховатости может вызвать смену сценария внезапного перехода на сценарий нестационарного внезапного перехода или сценария нестационарного внезапного перехода на сценарий эволюционного перехода, т. е. приводит к некоторому уменьшению влияния полосы шероховатости. Однако такое влияние ограничено и наблюдается только в том случае, если параметры перехода для различных сценариев перехода близки. Это, по-видимому, означает, что в условиях описываемых экспериментов основное влияние на сценарий перехода и его положение оказывает передняя кромка полосы шероховатости, которая всегда расположена ближе к передней кромке скользящей пластины, т. е. находится в более тонком пограничном слое, по сравнению со слоем на задней кромке.

Результаты, обобщенные выше, применимы к обоим изученным случаям: с повышенной степенью набегающего потока (сетка G1) и с повышенными амплитудами стационарных вихрей набегающего потока (сетка G9).

*6.4. Сравнение влияния сеток G1 и G9 на положение перехода.* Результаты определения положения перехода, полученные для режимов с усиленными нестационарными (сетка G1) и стационарными (сетка G9) возмущениями набегающего потока, представлены на рис. 12 в виде зависимостей координат точек перехода  $x'_{tr}$  и соответствующих чисел Рейнольдса  $Re'_{tr}$  и  $Re'_{2tr}$  от безразмерной высоты полосы шероховатости  $H/\delta_{1rb}$ .

На рис. 12,*a* видно, что положения эволюционных переходов, обнаруженные в различных режимах с усиленными стационарными возмущениями свободного потока (сетка G9), достаточно близки к положениям переходов, обнаруженным при усиленных нестационарных возмущениях (сетка G1). Поскольку при использовании сетки G9 скорость набегающего потока больше, чем при использовании сетки G1 для каждого фиксированного числа  $n$  оборотов вентилятора аэродинамической трубы (см. табл. 2), числа Рейнольдса  $Re'_{tr}$  также больше, причем это различие является более значительным (см. рис. 12,*b*). Несмотря на то что при различных скоростях свободного потока значения числа Рейнольдса  $Re'_{2tr}$  для двух сеток (G1 и G9) достаточно близки (см. рис. 12,*в*), в случае усиленных стационарных возмущений набегающего потока (сетка G9) они в среднем больше, чем в случае усиленных нестационарных возмущений (сетка G1).

Из рис. 12 следует, что в режимах с повышенной степенью турбулентности (сетка G1) влияние двумерных полос шероховатости становится значительным, в случае если их безразмерные высоты меньше, чем в режимах повышенных стационарных возмущений свободного потока (сетка G9). В случае использования сетки G1 нестационарный внезапный переход иногда происходит раньше и соответствующее смещение точки перехода вверх по потоку может быть более значительным по сравнению со случаем использования сетки G9.

Следует отметить, что результаты проведенных сравнений могут существенно зависеть от конкретных характеристик (прежде всего, от интенсивности, а также от масштабов) стационарных и нестационарных возмущений набегающего потока, создаваемых рассматриваемыми сетками.

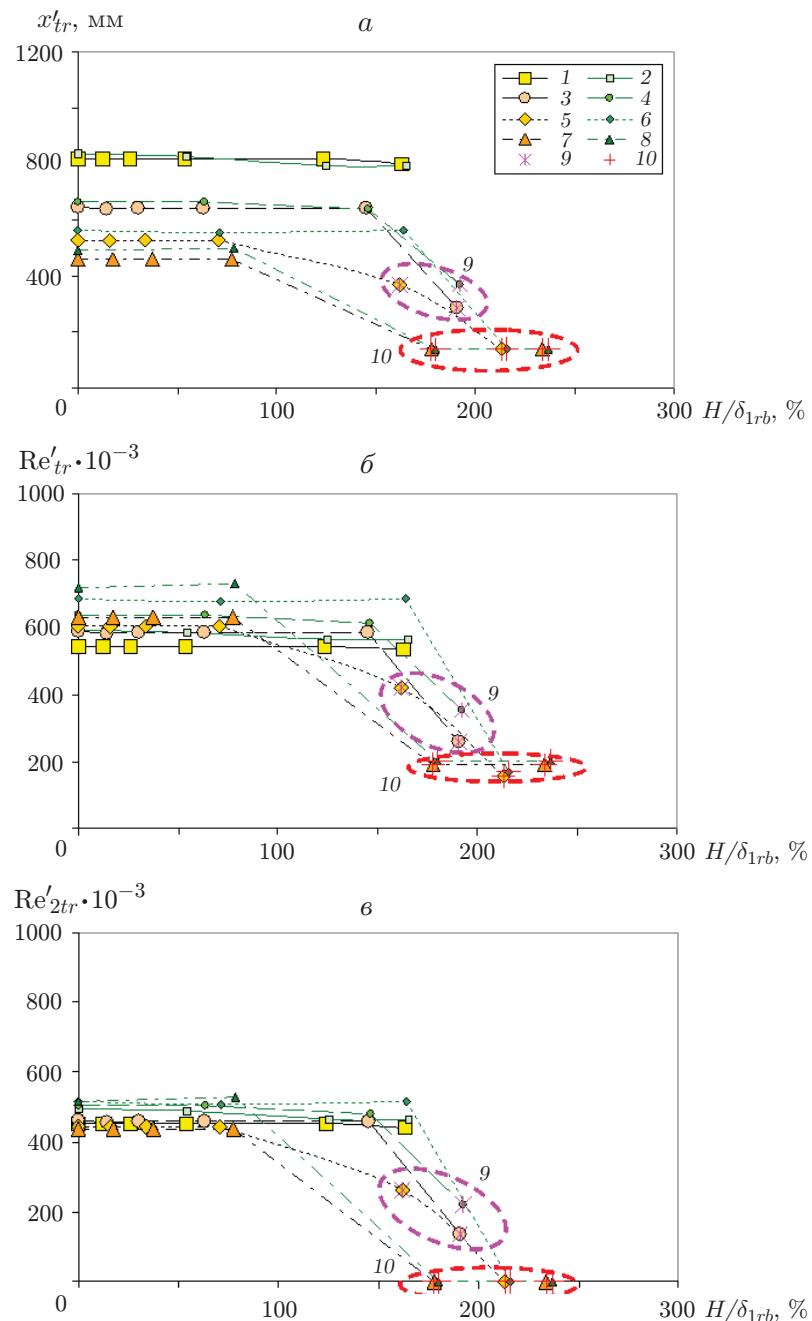


Рис. 12. Зависимости координаты точек перехода  $x'_{tr}$  (*a*) и чисел Рейнольдса  $Re'_{tr}$  (*б*) и  $Re'_{2tr}$  (*в*) от безразмерной высоты шероховатости  $H/\delta_{1rb}$ , полученные при различных значениях скорости набегающего потока для двух сеток и полосы шероховатости шириной 50 мм (W1):

1 — режим W1G1n120, 2 — режим W1G9n120, 3 — режим W1G1n160, 4 — режим W1G9n160, 5 — режим W1G1n200, 6 — режим W1G9n200, 7 — режим W1G1n240, 8 — режим W1G9n240, 9 — режимы нестационарного внезапного перехода, 10 — режимы внезапного перехода

Наиболее важным выводом из проведенного выше анализа положения перехода является то, что однородные по размаху двумерные полосы шероховатости с острыми кромками не влияют на положение перехода даже при наличии интенсивных трехмерных вихрей набегающего потока (стационарных или нестационарных), инициирующих процесс перехода.

*6.5. Влияние ширины полосы шероховатости на положение перехода.* На рис. 13 показаны зависимости координаты точки перехода  $x'_{tr}$  и числа Рейнольдса  $Re'_{2tr}$  от безразмерной высоты шероховатости  $H/\delta_{1rb}$  при различной ширине полосы шероховатости по хорде. Данные получены для различных скоростей набегающего потока при повышенной степени турбулентности (сетка G1) и для значений ширины полосы шероховатости по хорде, равных 50 мм (W1) и 150 мм (W2). Точки 3, 5 соответствуют случаям сглаженной задней кромки полосы шероховатости, для которых положение перехода отличается от полученного для острых задних кромок.

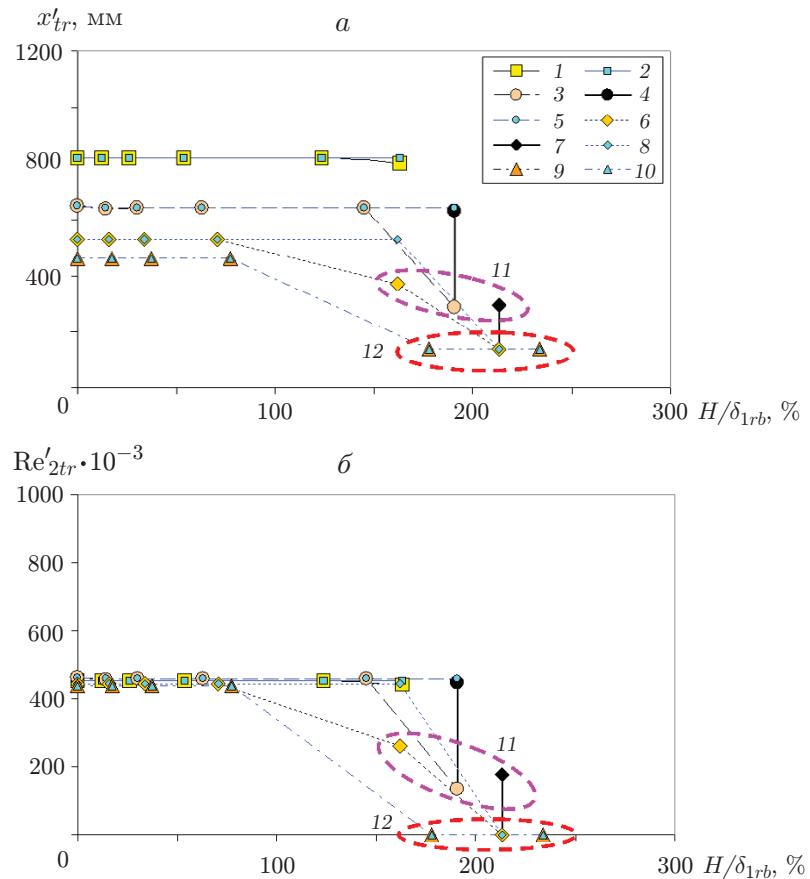


Рис. 13. Зависимости координаты точки перехода  $x'_{tr}$  (а) и числа Рейнольдса  $Re'_{2tr}$  (б) от безразмерной высоты шероховатости  $H/\delta_{1rb}$ , полученные при повышенных нестационарных возмущениях набегающего потока и различных значениях скорости набегающего потока для полос шероховатости различной ширины: 1 — режим W1G1n120, 2 — режим W2G1n120, 3 — режим W1G1n160, 4 — режим W1PG1n160, 5 — режим W2G1n160, 6 — режим W1G1n200, 7 — режим W1PG1n200, 8 — режим W2G1n200, 9 — режим W1G1n240, 10 — режим W2G1n240, 11 — режимы нестационарного внезапного перехода; крупные точки — полосы шириной  $l'_r = 50$  мм (W1), мелкие — полосы шириной  $l'_r = 150$  мм (W2)

Из рис. 13 следует, что изменение ширины полосы шероховатости практически не влияет на положение начала перехода (в рассмотренных случаях), в случае если сценарий перехода остается эволюционным. Этот вывод справедлив для всех изученных режимов со сценарием внезапного перехода. Однако указанное влияние имеет место, если параметры режима близки к параметрам режимов эволюционного и нестационарного внезапного переходов. В этом случае увеличение ширины полосы шероховатости с 50 до 150 мм (с W1 до W2) приводит к скачку от сценария нестационарного внезапного перехода (при ширине W1) к сценарию эволюционного перехода (при ширине W2). Фактически два режима со сценарием нестационарного внезапного перехода, наблюдаемые при ширине W1, отсутствуют при ширине W2. Аналогичная ситуация имеет место, в случае когда сглаживается задняя кромка узких полос шероховатости (W1), для сценария внезапного перехода, который преобразуется в сценарий нестационарного внезапного перехода.

В случаях усиленных стационарных возмущений набегающего потока (сетка G9), показанных на рис. 14, ситуация аналогична. Изменение ширины полосы шероховатости

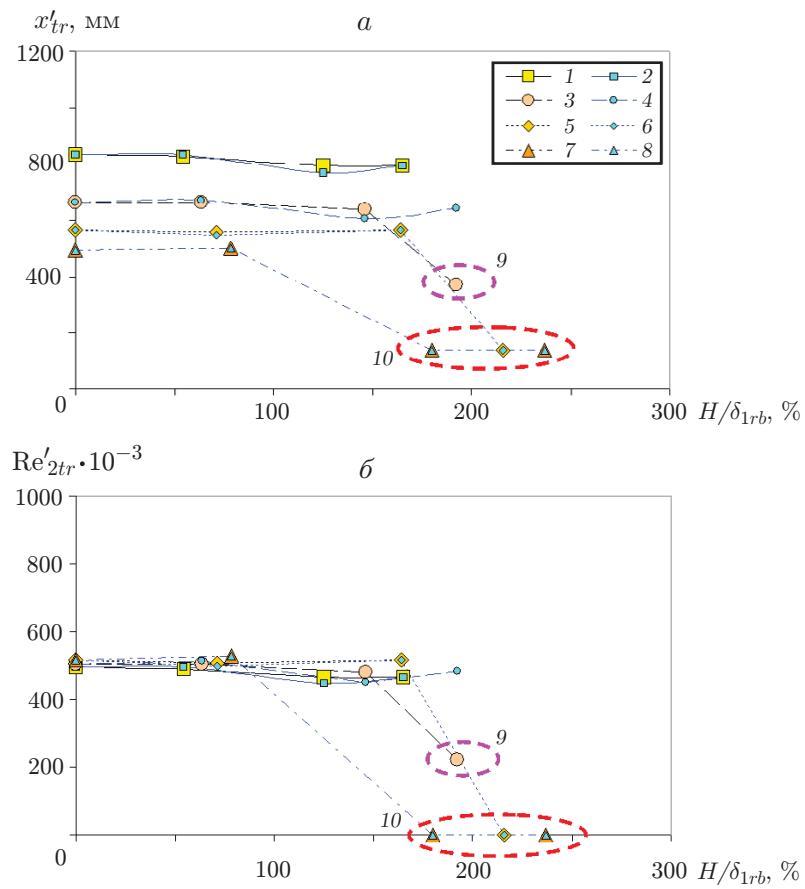


Рис. 14. Зависимости координаты точки перехода  $x'_{tr}$  (а) и числа Рейнольдса  $Re'_{2tr}$  (б) от безразмерной высоты шероховатости  $H/\delta_{1rb}$ , полученные при повышенных стационарных возмущениях потока и различных значениях скорости набегающего потока для полос шероховатости различной ширины:

1 — режим W1G9n120, 2 — режим W2G9n120, 3 — режим W1G9n160, 4 — режим W2G9n160, 5 — режим W1G9n200, 6 — режим W2G9n200, 7 — режим W1G9n240, 8 — режим W2G9n240, 9 — режим нестационарного внезапного перехода, 10 — режимы внезапного перехода; крупные точки — полосы шириной  $l'_r = 50$  мм (W1), мелкие — полосы шириной  $l'_r = 150$  мм (W2)

практически не влияет на положение начала перехода почти во всех изученных случаях (соответствующих сценарию эволюционного либо внезапного перехода). В режиме W1H5G9n160 сценарий нестационарного внезапного перехода, наблюдаемый для ширины шероховатости W1, меняется на сценарий эволюционного перехода при увеличении ширины шероховатости.

**Заключение.** Таким образом, экспериментально исследован процесс ламинарно-турбулентного перехода в 76 режимах в пограничном слое модели скользящего крыла с углом скольжения  $35^\circ$  при наличии и в отсутствие различных двумерных полос шероховатости для нескольких значений скоростей набегающего потока и для завихренности набегающего потока с повышенной степенью турбулентности (сетка G1) и с повышенной интенсивностью стационарных вихревых возмущений (сетка G9).

Сценарии эволюционного перехода обнаружены в 59 изученных режимах (включая три режима, параметры которых близки к параметрам режимов эволюционного перехода). В четырех режимах наблюдались сценарии нестационарного внезапного перехода, в 13 режимах обнаружены сценарии внезапного перехода.

Положения начала перехода (определенные по началу быстрой турбулизации потока, инициируемой локальными высокочастотными вторичными неустойчивостями) и величины амплитуд стационарных, нестационарных и комбинированных возмущений исследованы в 63 случаях (для сценариев эволюционного и нестационарного внезапного переходов).

Получены следующие основные результаты.

При преобладании стационарных вихрей в набегающем потоке (сетка G9) переход инициируется в основном стационарными модами неустойчивости ПТ, в то время как при преобладании нестационарных вихрей в набегающем потоке (сетка G1) переход инициируется в основном бегущими модами неустойчивости ПТ.

При безразмерных высотах полос шероховатости  $H/\delta_{1rb}$ , меньших 162 % ( $Re_{hrb} < 957$ ), сценарий перехода остается эволюционным и влияние двумерных полос шероховатости поверхности на положение перехода, а также на структуру возмущений пограничного слоя (как стационарных, так и бегущих), измеренных непосредственно перед точкой начала турбулизации течения, не наблюдается. При больших высотах шероховатости двумерные полосы могут влиять как на положение перехода, так и на структуру возмущений пограничного слоя, что приводит к трансформации сценария эволюционного перехода в один из сценариев внезапного перехода.

Увеличение ширины полосы шероховатости в три раза, а также сглаживание задней кромки узкой полосы позволяют предотвратить переход от сценария эволюционного перехода к сценарию внезапного перехода даже при  $H/\delta_{1rb} < 192\%$  и  $Re_{hrb} < 1061$ . Существенного влияния вида турбулизирующей сетки (G1 или G9) на эти пороговые высоты полосы шероховатости не обнаружено.

Сценарий перемежающегося нестационарного внезапного перехода инициируется, по-видимому, уступом на задней кромке полосы шероховатости, сглаживание которого или смещение вниз по потоку позволяет предотвратить возникновение этого сценария, т. е. преобразовать его в сценарий эволюционного перехода.

Полученный в работе основной результат существенно отличается от результатов, полученных для двумерных пограничных слоев (см., например, [8–10]). Установлено, что замена пограничного слоя с доминированием неустойчивости Толлмина — Шлихтинга на пограничный слой с преобладанием неустойчивости поперечного течения приводит к существенному уменьшению чувствительности процесса перехода к однородным по размаху полосам шероховатости, в том числе при наличии в набегающем потоке сильных трехмерных стационарных и нестационарных возмущений. В частности, на двумерном ламинаризированном крыле такие элементы шероховатости недопустимы, а на ламина-

ризированном скользящем крыле (рассмотренном в данной работе) их наличие может не препятствовать сохранению ламинарного режима обтекания даже при больших высотах этих элементов.

Авторы выражают благодарность Дж. Д. Краучу за ценный вклад в постановку задачи.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Crouch J. D.** Boundary-layer transition prediction for laminar flow control. S. l., 2015. (Paper / AIAA; N 2015-2472). DOI: 10.2514/6.2015-2472.
2. **Braslow A. L.** A history of suction-type laminar-flow control with emphasis on flight research. S. l.: NASA, 1999. (Monographs in aerospace history; N 13). [Электрон. ресурс]. Режим доступа: [https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2021/04/88792main\\_laminar.pdf](https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2021/04/88792main_laminar.pdf).
3. **Joslin R. D.** Aircraft laminar flow control // Ann. Rev. Fluid Mech. 1998. V. 30. P. 1–29. DOI: 10.1146/annurev.fluid.30.1.1.
4. **Nayfeh A. H.** Influence of two-dimensional imperfections on laminar flow. Warrendale, 1992. (Paper / SAE; N 921990). [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/921990>.
5. **Arnal D.** Boundary layer transition: Prediction, application to drag reduction // AGARD R-786. Neuilly sur Seine: AGARD, 1992. P. 5-1–5-59. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADP006968>.
6. **Шлихтинг Г.** Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1969.
7. **Borodulin V. I., Ivanov A. V., Kachanov Y. S.** Swept-wing boundary-layer transition at various external perturbations: Scenarios, criteria, and problems of prediction // Phys. Fluids. 2017. V. 29. 094101. DOI: 10.1063/1.4999952.
8. **Crouch J. D., Kosorygin V. S.** Surface-step effects on boundary-layer transition dominated by Tollmien — Schlichting instability // AIAA J. 2020. V. 58, N 7. P. 2943–2950. DOI: 10.2514/1.J058518.
9. **Crouch J. D., Kosorygin V. S., Sutanto M. I.** Modeling gap effects on transition dominated by Tollmien — Schlichting instability. S. l., 2020. (Paper / AIAA; N 2020-3075). DOI: 10.2514/6.2020-3075.
10. **Crouch J. D., Kosorygin V. S., Sutanto M. I., Miller G. D.** Characterizing surface-gap effects on boundary-layer transition dominated by Tollmien — Schlichting instability // Flow. 2022. V. 2. E8. DOI: 10.1017/flo.2022.1.
11. **Бойко А. В., Козлов В. В., Сызранцев В. В., Щербаков В. А.** Экспериментальное исследование процесса перехода к турбулентности на одиночном стационарном возмущении в пограничном слое скользящего крыла // ПМТФ. 1995. Т. 36, № 1. С. 72–84.
12. **Perraud J., Séraudie A.** Effects of steps and gaps on 2D and 3D transition // Proc. of the Europ. congress on computational methods in applied sciences and engineering ECCOMAS 2000, Barcelona (Spain), 11–14 Sept. 2000. Barcelona: Tech. Univ. of Catalonia, 2000. P. 1–18. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <https://www.researchgate.net/publication/230898184>.
13. **Rius-Vidales A. F., Kotsonis M.** Impact of a forward-facing step on the development of crossflow instability // J. Fluid Mech. 2021. V. 924. A34. DOI: 10.1017/jfm.2021.497.
14. **Radeztsky R. H., Reibert M. S., Saric W. S., Takagi S.** Effect of micron-sized roughness on transition in swept-wing flows. Reno, 1993. (Paper / AIAA; N 93-0076). DOI: 10.2514/6.1993-76.
15. **Deyhle H., Bippes H.** Disturbance growth in an unstable three-dimensional boundary layer and its dependence on environmental conditions // J. Fluid Mech. 1996. V. 316. P. 73–113. DOI: 10.1017/S0022112096000456.
16. **Crouch J. D.** Transition prediction and control for airplane applications. Snowmass Village, 1997. (Paper / AIAA; N 97-1907). DOI: 10.2514/6.1997-1907.

17. **Borodulin V. I., Ivanov A. V., Kachanov Y. S.** Quantitative visualization of transition scenarios in swept-wing boundary layers // Proc. of the 13th Asian symp. on visualization, Novosibirsk (Russia). Novosibirsk: Inst. Theor. Appl. Mech., 2015. 73. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <https://www.researchgate.net/publication/283071286>.
18. **Kachanov Y. S., Borodulin V. I., Ivanov A. V.** Problem of calculation of swept-wing boundary-layer transition to turbulence at elevated freestream turbulence levels // AIP Conf. Proc. 2016. V. 1770. 020010. DOI: 10.1063/1.4963933.
19. **Семенов Н. В., Ермолаев Ю. Г., Косинов А. Д.** Развитие возмущений в ламинаризированном сверхзвуковом пограничном слое на скользящем крыле // ПМТФ. 2008. Т. 49, № 2. С. 40–46.
20. **Borodulin V. I., Ivanov A. V., Kachanov Y. S., et al.** Laminar-turbulent transition of a swept-wing boundary layer under the influence of cylindrical trip devices // Материалы 22-й Междунар. конф. “Нелинейные задачи теории гидродинамической устойчивости и турбулентность”, г. Звенигород (Россия), 14–21 февр. 2016 г. М.: Изд-во Моск. гос. ун-та, 2016. С. 305–308. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <https://www.researchgate.net/publication/311515769>.
21. **Crouch J. D., Borodulin V. I., Ivanov A. V., Kachanov Y. S.** Gap effects on crossflow dominated transition in the presence of surface roughness and free-stream turbulence // Book of abstracts of the 12th Europ. research community on flow, turbulence and combustion ERCOFTAC SIG 33 Workshop “Progress in flow instability, transition and control”, Certosa di Pontignano (Italy), June 19–21, 2017. S. l., 2017. P. 23. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: [http://www.ercoftac.org/downloads/sig33/book\\_of\\_abstracts\\_2017.pdf](http://www.ercoftac.org/downloads/sig33/book_of_abstracts_2017.pdf).
22. **Kachanov Y. S., Borodulin V. I., Ivanov A. V., Crouch J. D.** Effects of surface steps on crossflow dominated swept-wing boundary-layer transition in presence of unsteady and steady freestream vortices // Book of abstracts of the 12th Europ. research community on flow, turbulence and combustion ERCOFTAC SIG 33 Workshop “Progress in flow instability, transition and control”, Certosa di Pontignano (Italy), June 19–21, 2017. S. l., 2017. P. 22. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: [http://www.ercoftac.org/downloads/sig33/book\\_of\\_abstracts\\_2017.pdf](http://www.ercoftac.org/downloads/sig33/book_of_abstracts_2017.pdf).
23. **Kachanov Y. S., Borodulin V. I., Ivanov A. V.** Effects of spanwise-uniform surface irregularities on a swept-wing boundary-layer transition initiated by cross-flow instability in presence of free-stream vortices. Pt 1. Experimental conditions and regimes of measurements: Interim project rep. on agreement N 106 (Exhibit 106W, pt B) / Inst. Theor. Appl. Mech. Novosibirsk, 2011.
24. **Kachanov Y. S., Borodulin V. I., Ivanov A. V.** Effects of spanwise-uniform surface irregularities on a swept-wing boundary-layer transition initiated by cross-flow instability in presence of free-stream vortices. Pt 2. Transition locations and disturbance amplitudes at transition: Final project rep. on agreement N 106 (Exhibit 106W, pt B) / Inst. Theor. Appl. Mech. Novosibirsk, 2011.
25. **Borodulin V. I., Ivanov A. V., Kachanov Y. S., Roschekhtayev A. P.** Distributed vortex receptivity of swept-wing boundary layer. Pt 1. Efficient excitation of CF modes // J. Fluid Mech. 2020. V. 908. A14. DOI: 10.1017/jfm.2020.846.
26. **Borodulin V. I., Ivanov A. V., Kachanov Y. S., et al.** Criteria of swept-wing boundary-layer transition and variable N-factor methods of transition prediction // Proc. of the 27th Intern. conf. on methods of aerophysical research, Novosibirsk (Russia), June 30 — July 6, 2014. Novosibirsk: Inst. Theor. Appl. Mech., 2014. 12. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <https://www.researchgate.net/publication/266284937>.

Поступила в редакцию 15/XI 2023 г.,  
после доработки — 18/I 2024 г.  
Принята к публикации 29/I 2024 г.