

УДК 532.5

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ПРИ ОБТЕКАНИИ ПОТОКОМ ВОЗДУХА ОДНОГО ХОЛМА И ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ХОЛМОВ, РАСПОЛОЖЕННЫХ НА ГЛАДКОМ И ШЕРОХОВАТОМ ОСНОВАНИЯХ

М. Бельмахди, Р. Зегеди, С. Симоэнс\*, С. Бухарати\*\*

Институт оптики и точной механики Университета г. Сетиф, Сетиф, Алжир

\* Лаборатория механики жидкости и акустики Национального центра научных исследований, Лион, Франция

\*\* Университет г. Сетиф, Сетиф, Алжир

E-mails: miloud\_belmahdi@yahoo.fr, rzegadi@yahoo.fr, serge.simoens@ecl-lyon.fr, sbouharati@yahoo.fr

Приведены результаты экспериментального исследования турбулентного течения в пограничном слое при обтекании потоком воздуха поперечных сечений возвышенностей (холмов). Определены характеристики турбулентного потока в пограничном слое при обтекании потоком воздуха в аэродинамической трубе одиночного холма и двух холмов, расположенных на различных расстояниях друг от друга. С использованием метода анемометрии по изображениям частиц измерены средняя и пульсационная скорости. Определены характеристики потока над холмами и в зонах рециркуляции. Проведено сравнение средних и пульсационных скоростей потока и размеров зон рециркуляции при обтекании одного холма и двух холмов. Рассмотрены случаи гладких и шероховатых оснований холмов.

Ключевые слова: метод анемометрии по изображениям частиц, поперечные сечения возвышенностей, рециркуляция, турбулентность.

DOI: 10.15372/PMTF20180602

**Введение.** Основные трудности при изучении течения, возникающего при обтекании крутых возвышенностей (холмов), обусловлены наличием отрыва потока и возникновением зон рециркуляции за вершинами этих холмов. Моделирование таких течений невозможно выполнить на основе линейной теории Джексона — Ханта [1], что подтверждается экспериментальными исследованиями [2].

В работе [3] проведено численное моделирование пограничного слоя на шероховатой поверхности и получены эмпирические формулы для скорости и напряжений сдвига. В [4] определены средняя и пульсационные скорости турбулентного течения в пограничном слое при обтекании потоком холмов различной формы и с различными свойствами поверхностей, исследовано влияние на течение формы холмов и свойств их поверхностей. Установлено, что зоны рециркуляции, образующиеся при обтекании крутых холмов, больше, чем при обтекании пологих холмов. В работе [5] при исследовании течения при наличии холмов синусоидальной формы, расположенных на гладких и шероховатых основаниях, уста-

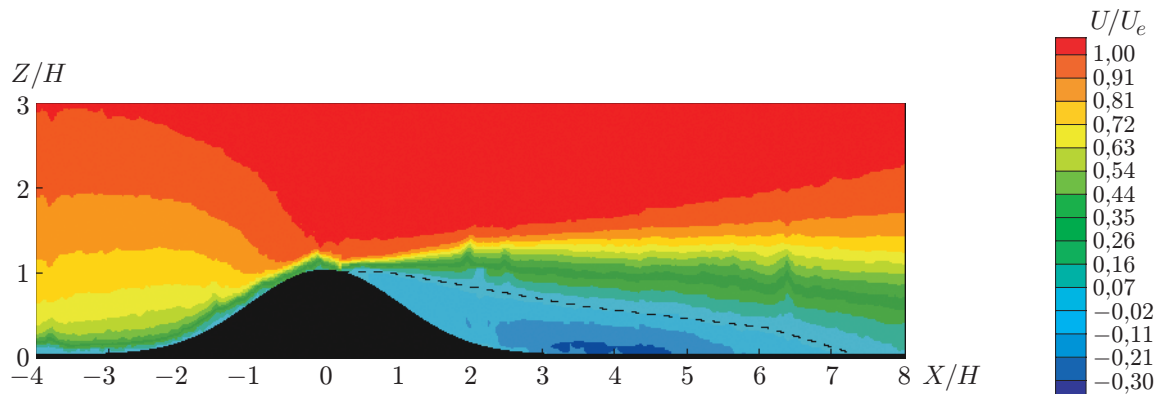


Рис. 1. Поля скорости  $U/U_e$  при наличии одиночного холма, расположенного на гладком основании:  
штриховая линия — линия отрыва потока

новлено, что в случае шероховатых оснований образуются зоны рециркуляции большего размера. Также отмечено, что на размер рециркуляционной зоны существенное влияние оказывает скорость потока, обтекающего препятствие.

В работе [6] исследовалось течение за одним холмом и за последовательностью периодически расположенных холмов. В работе [7], посвященной исследованию влияния на течение числа Рейнольдса и расстояния между холмами, установлено, что длина зоны рециркуляции, образующейся за вторым холмом, уменьшается с увеличением числа Рейнольдса в потоке над холмом.

Целью настоящей работы является исследование характеристик зон рециркуляции, образующихся вниз по течению за вершинами крутых холмов. В отличие от работ [6, 7], в которых изучалось течение при наличии периодически расположенных холмов, в данной работе исследуется турбулентное течение при наличии в потоке двух холмов одинаковой высоты с различными расстояниями между их вершинами. Рассмотрены случаи холмов, расположенных на гладких и шероховатых основаниях. Проведено сравнение характеристик основного и турбулентного течений при наличии одиночного холма и двух последовательно расположенных холмов и трех значениях скорости обтекающего потока.

**1. Методика эксперимента.** Исследуется течение турбулентного пограничного слоя на гладкой или шероховатой пластине, расположенной в средней плоскости на высоте 25 см от платформы аэродинамической трубы, установленной в Центральной школе г. Лиона (Франция).

Первое препятствие, имеющее форму “гауссова холма” (далее холм), расположено на пластине перпендикулярно направлению потока на расстоянии 255 см от передней кромки (рис. 1). Для того чтобы инициировать и стабилизировать ламинарно-турбулентное течение пограничного слоя на гладких и шероховатых основаниях, на пластине на расстоянии 2 см от передней кромки прикреплялась лента наждачной бумаги, за которой располагался стержень диаметром 5 мм.

Для визуализации изображений и получения количественной информации о структуре течения в поток на входе в камеру гомогенизации впрыскивалась суспензия твердых частиц. Для значений числа Рейнольдса, при которых проводились эксперименты, использовались частицы размером 0,9 мкм [8]. Также в экспериментах использовался импульсный лазер Nd-YAG с двойной полостью, излучающий на видимой волне длиной 532 нм импульс с энергией 150 мДж. Энергия, генерируемая лазером, с помощью цилиндрической линзы распределялась по листу толщиной 0,5 мм. Частота пар импульсов могла достигать 4 Гц,

что достаточно для получения изображения. Изображения получены с помощью CMOS-камеры PCO 4000.

Для определения характеристик турбулентного пограничного слоя на плоской стенке, инициируемого набегающим потоком, предварительно проведено несколько серий измерений поля скоростей. На основе полученных данных выбраны три скорости набегающего потока:  $U_e = 2,98; 7,92; 11,20$  м/с, соответствующие скоростям потока, использовавшимся в экспериментах в аэродинамической трубе [8].

В турбулентном пограничном слое на равномерной гладкой поверхности средний логарифмический профиль скорости можно определить из соотношения

$$\frac{U}{u_f} = \frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{Z_z u_f}{\nu} \right) + A, \quad (1)$$

на шероховатой поверхности — из соотношения

$$\frac{U}{u_f} = \frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{Z_z}{Z_0} \right),$$

где  $u_f$  — скорость сдвига;  $\nu$  — кинематическая вязкость;  $A$  — константа, в случае гладкого основания изменяющаяся в диапазоне  $5,0 \div 5,5$ ;  $Z_0$  — размер элемента шероховатости;  $\kappa = 0,41$  — константа Кармана. Справедливость логарифмического закона можно проверить, построив с использованием переменных  $U^+ = U/u_f$ ,  $Z_z^+ = Z_z u_f / \nu$  в полулогарифмических координатах кривую, соответствующую соотношению (1). Для часто расположенных препятствий не всегда целесообразно отсчитывать высоту от основания (земли). Можно утверждать, что уровень, от которого следует отсчитывать высоту, находится между основанием и вершиной элемента шероховатости. Нулевой уровень определяется на основе измерений скорости потока воздуха в поверхностном слое. Высоту можно определить из соотношения  $Z_z = Z - Z_d$  ( $Z$  — высота, отсчитываемая от основания;  $Z_z$  — высота, отсчитываемая от нулевого уровня;  $Z_d$  — так называемое смещение высоты). Значение  $Z_d$  находится между нулевой и средней высотой элемента шероховатости и зависит как от формы неровностей, так и от плотности их расположения. Модифицированное уравнение для логарифмического профиля скорости записывается в виде

$$\frac{U}{u_f} = \frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{Z - Z_d}{Z_0} \right). \quad (2)$$

Скорость сдвига  $u_f$  и размер элемента шероховатости  $Z_0$  определяются путем подгонки зависимости (2) под экспериментальные данные.

Характеристики пограничного слоя на расстоянии 255 см от передней кромки в случаях гладкого и шероховатого оснований приведены в табл. 1. На этом расстоянии толщина

Таблица 1

Параметры пограничного слоя на расстоянии  $x = 255$  см от передней кромки при различных значениях скорости основного потока в случае одиночного холма, расположенного на гладком или шероховатом основании

Вид основания	$U_e$ , м/с	$u_f$ , м/с	$\delta$ , см	$Re_H$	$Re_\theta$	$Z_d$ , мм	$Z_0$ , мм
Гладкое	2,98	0,113	7,0	1910	1180	—	—
	7,92	0,236	6,5	5077	2580	—	—
	11,20	0,380	5,5	7179	3400	—	—
Шероховатое	2,98	0,142	7	1910	—	195	8,2
	7,92	0,422	7	5077	—	195	8,2
	11,20	0,594	7	7179	—	195	8,2

пограничного слоя приблизительно равна 7 см. При этом отношение  $H/\delta \approx 1/7$  [9] является одним из основных параметров, определяющих длину зоны рециркуляции, образующейся за препятствием вниз по течению, равную приблизительно  $7H$ . В работах [6, 8, 9], в которых кинематика течения исследовалась в двумерной постановке, протяженность зоны рециркуляции вниз по потоку равна приблизительно  $8H$ , т. е.  $H/\delta \approx 1/8$ . Для имитации шероховатости песчаных почв шероховатость стенки обеспечивалась путем нанесения на нее сильно компактированных склеенных твердых частиц, диаметр которых варьировался в диапазоне  $170 \div 200$  мкм [9]. Выбранные гауссова форма препятствий и их размер обеспечивают генерацию большой зоны рециркуляции с подветренной стороны препятствия и типичную структуру пограничного слоя [10]. Форма препятствия описывается уравнением

$$X = H e^{-49(Z/H)^2},$$

где  $H = 1$  см — высота препятствия. Вырезанное из пластмассы препятствие устанавливалось на расстоянии 255 см от передней кромки. Положение и размер препятствия соответствовали положению и размеру препятствия в форме куба, использовавшегося в работе [8].

Для исследования влияния на пограничный слой последовательности препятствий на некотором расстоянии от первого препятствия помещалось аналогичное второе препятствие. Исследовались два варианта расположения препятствий. В первом варианте расстояние между вершинами препятствий равно  $L = 3H$ , во втором —  $L = 8H$ . Как и в случае одиночного препятствия, исследовались набегающие потоки с тремя скоростями.

**2. Результаты исследования и их обсуждение.** Ниже приведены результаты экспериментального исследования обтекания препятствий, расположенных на гладком или шероховатом основании.

*2.1. Осредненное течение при наличии одного препятствия на гладком основании.* На рис. 1 показано поле скоростей при обтекании одиночного холма, расположенного на гладком основании. Видно, что над вершиной холма поток ускоряется. Вдоль штриховой кривой скорости частиц жидкости равны нулю. Расстояние от точки пересечения этой кривой со стенкой препятствия до основания холма равно  $0,6H \div 0,8H$  и зависит от характера течения вверх по потоку от препятствия. Данное расстояние меньше в случае холма, расположенного на гладком основании, поскольку в этом случае скорость потока вблизи вершины холма больше, чем в случае холма, расположенного на шероховатом основании. Согласно работе [11] ускорение потока, обусловленное наклоном препятствия, сопровождается уменьшением пульсационной скорости потока. Это подтверждается тем, что в случае гладкого основания течение быстрее возвращается к ламинарному, чем в случае шероховатого основания [6, 10].

*2.2. Зона рециркуляции за одиночным холмом, расположенным на гладком основании.* Размер “пузыря” отрыва (зоны рециркуляции) характеризуется его длиной и высотой, которая определяет толщину потери импульса. Характеристиками этого “пузыря” являются длины двух пересекающихся отрезков  $L_{AB}$  и  $L_{DE}$  (рис. 2). Длина отрезка  $AB$  определяет наибольший размер зоны рециркуляции вдоль склона холма, длина отрезка  $DE$ , проходящего через центр зоны рециркуляции и пересекающего крайнюю линию тока этой зоны, — толщину разделяющей петли.

В табл. 2 приведены характеристики зоны рециркуляции при обтекании одиночных холмов, расположенных на гладком и шероховатом основаниях, и различных скоростях набегающего потока [9].

Координаты центра зоны рециркуляции практически одинаковы для случаев обтекания одиночных холмов на гладком и шероховатом основаниях. Длина отрезка  $AB$ , соединяющего точку отрыва и точку присоединения потока, зависит от скорости набегающего

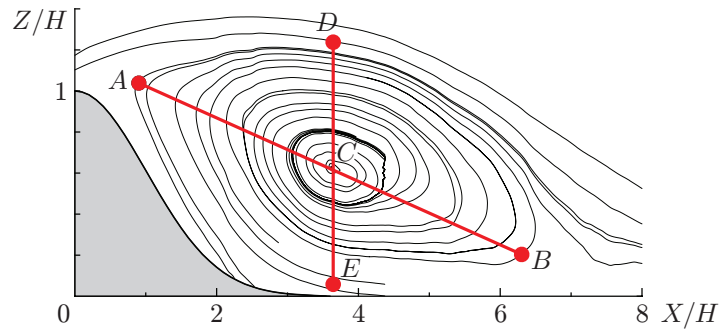


Рис. 2. Зона рециркуляции в случае одиночного холма, расположенного на гладком основании

Таблица 2

Параметры зоны рециркуляции, образующейся за одиночным холмом, расположенным на гладком или шероховатом основании

Вид основания	$U_e$ , м/с	$X/H$	$Z/H$	$L_{DE}$ , см	$L_{AB}$ , см
Гладкое	2,98	3,65	0,58	$0,82H$	$6,15H$
	7,92	3,58	0,59	$0,70H$	$6,80H$
	11,20	3,54	0,59	$0,64H$	$6,90H$
Шероховатое	2,98	3,61	0,58	$1,44H$	$6,15H$
	7,92	3,60	0,61	$1,10H$	$7,35H$
	11,20	3,60	0,62	$0,96H$	$7,50H$

потока и шероховатости основания. Длина вертикального отрезка  $DE$  в случае шероховатого основания больше, чем в случае гладкого основания, и уменьшается с увеличением скорости набегающего потока, что свидетельствует о выполаживании в этом случае зоны рециркуляции. Несмотря на то что формы зоны рециркуляции при обтекании одиночных холмов на гладком и шероховатом основаниях аналогичны, их размеры различаются. Это различие увеличивается с увеличением скорости набегающего потока.

2.3. *Турбулентное течение при обтекании одиночного холма.* На рис. 3 приведено распределение по вертикали пульсационной безразмерной продольной скорости  $u'/U_e$  ( $u'$  — среднеквадратичная пульсационная скорость). За холмом вниз по течению профиль скорости  $u'/U_e$  резко меняется, что обусловлено наличием сдвигового потока, возникающего за гребнем холма и направленного к точке отрыва потока. Эти возмущения развиваются вниз по потоку, достигая максимального значения, затем вследствие диссипации и диффузии уменьшаются и возвращаются к значению, которое они имели выше по течению. Максимальное значение пульсационной скорости приблизительно в два раза больше ее значения, которое достигается на высоте холма в исходном потоке. В случае холма, расположенного на гладком основании, пульсационная скорость достигает максимального значения в точке, находящейся на расстоянии от вершины холма, равном  $2H \div 3H$ . В случае холма, расположенного на шероховатом основании, это расстояние превышает значение  $3H$ .

Как в случае гладкого, так и в случае шероховатого основания максимальные значения скорости  $(u'/U_e)_{\max}$  достигаются на линии разрыва скоростей (см. рис. 3), которая находится в центре сдвигового слоя, расположенного в случае шероховатого основания выше, чем в случае гладкого. Следует отметить, что при любых значениях скорости набегающего потока величина  $u'/U_e$  вверх по потоку от холма в случае шероховатого основания больше, чем в случае гладкого. Однако вниз по течению от препятствия на высоте, меньшей высоты препятствия, скорость  $u'/U_e$  в случае гладкого основания больше, чем в случае

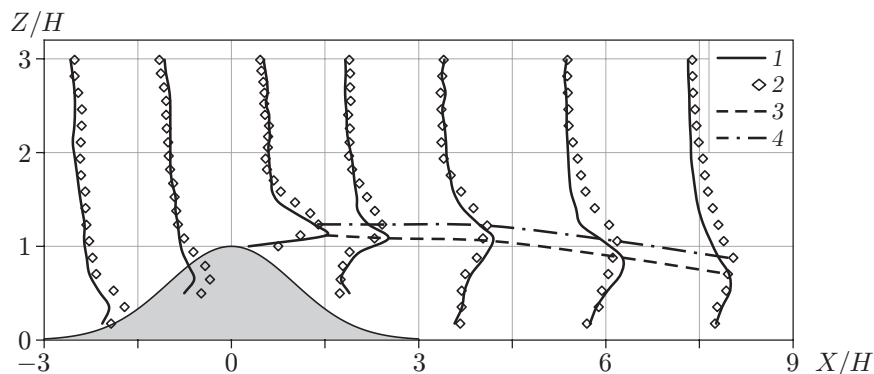


Рис. 3. Профили пульсационной  $u'/U_e$  (1, 2) и максимальной пульсационной  $(u'/U_e)_{\max}$  (3, 4) скоростей в случае обтекания одиночного холма, расположенного на гладком (1, 3) или шероховатом (2, 4) основании, при скорости основного потока  $U_e = 2,98$  м/с

шероховатого. На высоте, превышающей высоту холма, величина  $u'/U_e$  в случае шероховатого основания больше, чем в случае гладкого основания. Это означает, что в случае шероховатого основания сдвиговый слой оказывает меньшее влияние на пульсационную скорость, чем в случае гладкого основания.

2.4. *Осредненное течение при наличии последовательности холмов.* На рис. 4 представлены картины течения при наличии двух холмов, расположенных на шероховатом основании. При расстоянии между вершинами холмов, равном  $L = 3H$ , центр зоны рециркуляции находится практически посередине (см. рис. 4, а). Видно, что в случае малого ( $L = 3H$ ) расстояния между холмами вихрь смещается незначительно. Точка торможения потока расположена вблизи вершины второго холма с наветренной стороны, ее положение зависит от скорости набегающего потока.

При обтекании внешним потоком двух холмов образуются две отдельные зоны рециркуляции, огибающая которых имеет один пик, что характерно для случая обтекания одиночного холма [12]. Это подтверждается положением точки торможения, которая находится на высоте, практически равной высоте холма. Описанная выше картина течения характерна для случая как гладкого, так и шероховатого основания, однако в случае гладкого основания вторая зона рециркуляции больше.

При расстоянии между вершинами холмов, равном  $L = 8H$ , размер зоны рециркуляции (см. рис. 4, б) практически не зависит от свойств основания, однако ее толщина существенно зависит от скорости набегающего потока. При увеличении скорости набегающего потока положение точки торможения потока на втором холме сдвигается к его вершине. В случае и гладкого, и шероховатого препятствия вторая зона рециркуляции уменьшается с увеличением скорости набегающего потока и приближается ко второму холму с подветренной стороны. Как правило, размер этой зоны меньше, чем в случае одиночного холма. В работе [13] отмечается, что, в случае если расстояние между вершинами холмов становится равным  $4H$  или больше  $12H$ , зоны рециркуляции при обтекании двух холмов аналогичны зоне рециркуляции при обтекании одиночного холма.

Из рис. 4 следует, что с увеличением расстояния между вершинами холмов размер первой зоны рециркуляции увеличивается, а второй — уменьшается. При расстоянии между вершинами холмов, равном  $3H$ , скорость набегающего потока не оказывает влияния на размер и положение первой области рециркуляции. Иными словами, по мере приближения точки торможения на втором холме к его вершине влияние наличия второго холма на размер зоны рециркуляции уменьшается. В случае расположения вершин препятствий

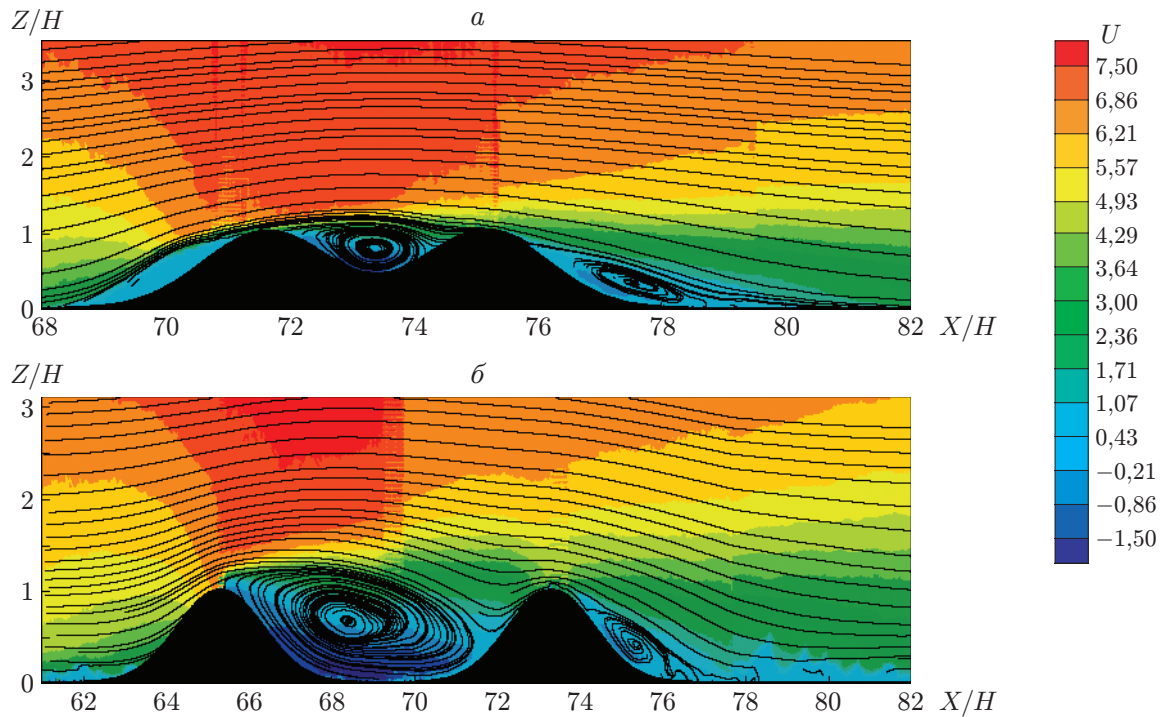


Рис. 4. Поля и линии тока течения в случае двух холмов, расположенных на шероховатом основании, при различных расстояниях между вершинами и скорости основного потока  $U_e = 7,92$  м/с:  
 $a$  —  $L = 3H$ ,  $b$  —  $L = 8H$

на расстоянии  $L = 8H$  друг от друга с увеличением скорости набегающего потока точка присоединения потока в первой зоне рециркуляции удаляется от подножия второго холма.

Размер второй зоны рециркуляции уменьшается при увеличении расстояния между вершинами холмов и скорости набегающего потока. При расстоянии между вершинами холмов, равном  $L = 8H$ , средняя скорость потока на восходящих склонах холмов вблизи их вершин в случае гладкого основания меньше, чем в случае шероховатого (рис. 5), что обусловлено размером второй зоны рециркуляции.

2.5. *Турбулентное течение при наличии последовательности холмов.* Как отмечалось выше, при наличии одиночного холма интенсивность турбулентного потока в случае гладкого основания больше, чем в случае шероховатого. Максимальные значения интенсивности турбулентного потока соответствуют течению на большей высоте.

Характер распределения пульсационной скорости одинаков для всех типов холмов и скоростей набегающего потока и аналогичен характеру распределения пульсационной скорости при наличии одного холма.

При любых скоростях набегающего потока напряжения Рейнольдса в случае шероховатых оснований больше, чем в случае гладких, и достигают максимальных значений в середине области, расположенной между холмами, на высоте, равной  $Z/H = 1,2$ . Вследствие незначительного торможения потока вблизи вершины второго холма происходит уменьшение напряжений Рейнольдса и увеличение глубины, на которой расположен сдвиговый слой. Далее вниз по потоку напряжения Рейнольдса вновь увеличиваются, достигая максимального значения при  $X/H = 4,5$ . В этой области незначительный обмен импульсами в потоке приводит к смещению сдвигового течения в верхние слои потока, расположенные на высоте  $Z/H > 2$ . Основным отличием развития сдвиговых напряжений Рейнольдса



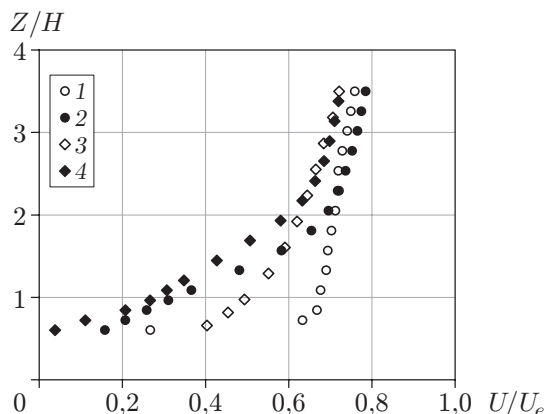


Рис. 5. Распределения скоростей на восходящих склонах холмов при расстоянии между их вершинами, равном  $8H$ , и скорости основного потока  $U_e = 7,98$  м/с: 1, 2 — первый и второй холмы на гладком основании, 3, 4 — первый и второй холмы на шероховатом основании соответственно

является бóльшая толщина зоны рециркуляции в случае расположения холмов на расстоянии  $L = 8H$ , чем на расстоянии  $L = 3H$ .

При расстоянии между вершинами холмов  $L = 3H$  происходит существенное увеличение сдвиговых напряжений, которые быстро уменьшаются по мере удаления от холмов. В случае шероховатого основания сдвиговые напряжения уменьшаются быстрее, чем в случае гладкого.

На рис. 6 приведены профили средней скорости и сдвиговых напряжений Рейнольдса при наличии на шероховатом основании одиночного холма и двух холмов, расстояние между вершинами которых равно  $3H$ . При наличии двух холмов вне пограничного слоя средняя скорость потока над вершиной первого холма меньше скорости потока над вершиной одиночного холма (см. рис. 6,а). Как и предполагалось, профили сдвиговых напряжений Рейнольдса в том же сечении для этих вариантов расположения холмов одинаковы (см. рис. 6,б). Внутри области отрыва потока эти напряжения уменьшаются вследствие отсутствия обмена импульсами и наличия интенсивной турбулентности потока. На восходящем склоне второго холма пульсационная скорость уменьшается. В отличие от случая одного холма при наличии двух холмов на восходящем склоне второго холма напряжения Рейнольдса уменьшаются более чем на 50 %. Вниз по течению от второго холма между основанием и вершиной холма напряжения Рейнольдса больше, чем в случае одиночного холма. Вниз по течению поток остается разделенным вплоть до точки присоединения, при этом в нем генерируются напряжения сдвига.

На рис. 6,в,г представлены распределения по потоку средней скорости и напряжений сдвига при обтекании одиночного холма и двух холмов, расстояние между вершинами которых равно  $8H$ . При наличии двух холмов сдвиговое течение вдоль склона первого холма вниз по течению менее развито, чем в случае обтекания одиночного холма (см. рис. 6,г). Это подтверждается также небольшим значением градиента скорости между основаниями холмов. Вблизи основания первого холма ( $X/H = -2$ ) максимальное значение напряжений сдвига  $-\overline{u'w'}$  на 10 % больше, чем в случае обтекания потоком одиночного холма (см. рис. 6,г). При наличии двух холмов происходит интенсивное перемешивание в вертикальном направлении. В отличие от случая обтекания одиночного холма при обтекании двух



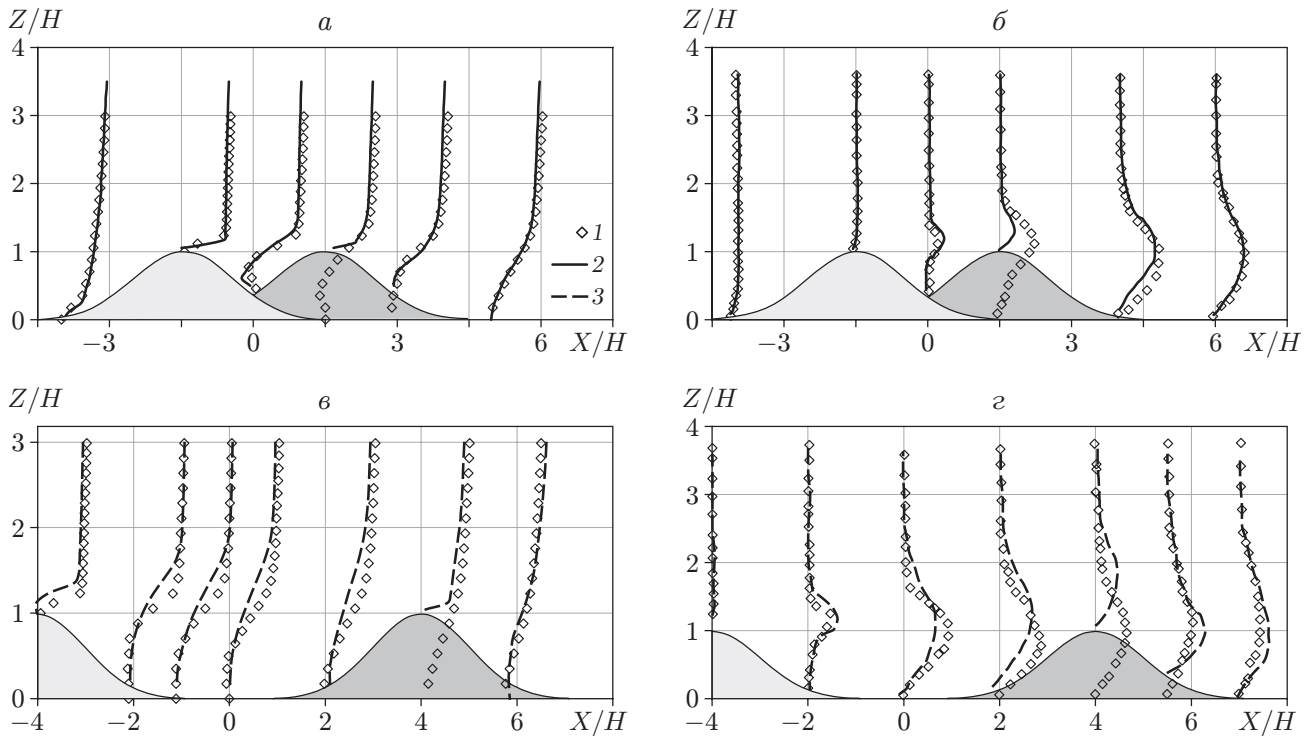


Рис. 6. Профили средней скорости (*а*, *в*) и сдвиговых напряжений Рейнольдса (*б*, *г*) при скорости основного потока  $U_e = 7,98$  м/с для различных вариантов расположения холмов на шероховатом основании:

- 1 — одиночный холм, 2 — два холма, расстояние между вершинами которых равно  $3H$ ,
- 3 — два холма, расстояние между вершинами которых равно  $8H$

холмов точка вторичного присоединения потока находится ближе к холму ( $X/H = 2$ ), и в этом случае сдвиговый слой над вершиной холма незначителен ( $Z/H = 1$ ).

Если рассматривать холмы в качестве больших элементов шероховатости, погруженных в турбулентный слой, то полученные результаты подтверждают существование трех режимов течения Морриса [14].

В случае первого режима течения (течения с изолированным препятствием) образуется область развитой рециркуляции. В случае второго режима течения (течения при наличии последовательности шероховатостей, расположенных на малом расстоянии ( $L = 3H$ )) места для образования развитой области отрыва течения недостаточно. В случае третьего режима течения (течения при наличии шероховатостей, расположенных на большом расстоянии (в настоящей работе  $L = 8H$ , в работе [13]  $L = 12H$ )) между шероховатостями образуется развитая зона рециркуляции. Согласно [14] при  $L = 3H$  течение аналогично течению в спутном следе, при  $L = 8H$  — течению при наличии застойных зон с устойчивыми вихрями между элементами шероховатости.

**Заключение.** В работе проведено экспериментальное исследование обтекания потоком воздуха одиночного холма и последовательности холмов, расположенных на гладком или шероховатом основании.

При обтекании потоком одиночного препятствия с любой скоростью, рассмотренной в работе, в окрестности вершины холма скорость потока увеличивается, вследствие чего ниже по потоку образуется большая зона рециркуляции. Размер зоны рециркуляции зависит от степени шероховатости основания холма и числа Рейнольдса.

При наличии в потоке двух холмов, расстояние между вершинами которых равно  $3H$ , в целом характеристики потока такие же, как и в случае одиночного холма. Первая зона рециркуляции, образуемая между холмами, по-видимому, не зависит от скорости основного потока и свойств оснований холмов, что обусловлено малым расстоянием между ними. Размер вихря, образующегося за вторым холмом, всегда меньше, вследствие того что точка вторичного присоединения потока находится ближе к вершине холма.

Как в случае, когда расстояние между вершинами холмов равно  $3H$ , так и в случае, когда расстояние между вершинами холмов равно  $8H$ , флуктуации скорости потока и сдвиговые напряжения Рейнольдса начинают увеличиваться от вершины первого холма, достигая максимального значения в середине области между холмами. В случае шероховатого основания напряжения Рейнольдса больше, чем в случае гладкого основания, всюду вплоть до спутной струи, где они одинаковы.

Свойства оснований холмов, исследованных в экспериментах, не влияют на характеристики турбулентного течения при любом расстоянии между холмами, что согласуется с известными результатами исследований. Основными факторами, влияющими на структуру течения, являются форма холмов и скорость набегающего потока.

Характеристики потока, обтекающего два холма, расстояние между вершинами которых равно  $3H$ , практически такие же, как и характеристики потока, обтекающего одиночный холм. Однако в первом случае наблюдается незначительное замедление течения в пограничном слое. В отличие от потока, обтекающего одиночный холм, в потоке, обтекающем два холма, расстояние между вершинами которых равно  $8H$ , скорость и сдвиговые напряжения Рейнольдса существенно уменьшаются за первым холмом. За вершиной второго холма характеристики потока одинаковы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Jackson P., Hunt J.** Turbulent wind flow over a low hill // *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 1975. V. 101. P. 929–955.
2. **Mason P., King J.** Measurements and predictions of flow and turbulence over an isolated hill of moderate slope // *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 1985. V. 111. P. 617–640.
3. **Deaves D.** Computations of wind flow over two-dimensional hills and embankments // *J. Wind Engng Industr. Aerodynamics.* 1980. V. 6. P. 89–111.
4. **Carpenter P., Locke N.** Investigation of wind speeds over multiple two-dimensional hills // *J. Wind Engng Industr. Aerodynamics.* 1999. V. 83. P. 109–120.
5. **Cao S., Tamura T.** Experimental study on roughness effects on turbulent boundary layer flow over a two-dimensional steep hill // *J. Wind Engng Industr. Aerodynamics.* 2006. V. 94. P. 1–19.
6. **Almeida G., Duraõ D., Heitor M.** Wake flows behind two-dimensional model hills // *Experiment. Thermal Fluid Sci.* 1993. V. 7. P. 87–101.
7. **Rapp C., Manhart M.** Flow over periodic hills: an experimental study // *Experiments Fluids.* 2011. V. 51. P. 247–269.
8. **Vinçont J.-Y., Simoens S., Ayrault M., Wallace J.** Passive scalar dispersion in a turbulent boundary layer from a line source at the wall and downstream of an obstacle // *J. Fluid Mech.* 2000. V. 424. P. 127–167.
9. **Simoëns S., Saleh A., Leribault C., et al.** Influence of Gaussian hill on concentration of solid particles in suspension inside turbulent boundary layer // *Procedia IUTAM.* 2015. V. 17. P. 110–118.
10. **Li Q., Maeda T., Kamada Y., Yamada K.** Experimental investigation of flow over two-dimensional multiple hill models // *Sci. Total Environment.* 2017. V. 609. P. 1075–1084.

11. **Cao S., Tamura T.** Effects of roughness blocks on atmospheric boundary layer flow over a two-dimensional low hill with/without sudden roughness change // J. Wind Engng Industr. Aerodynamics. 2007. V. 95. P. 679–695.
12. **Kaimal J. C.** Atmospheric boundary layer flows: their structure and measurement / J. C. Kaimal, J. J. Finnigan. Oxford: Oxford Univ. Press, 1994.
13. **Ferreira A., Silva M., Viegas D., Lopes A.** Wind tunnel simulation of the flow around two-dimensional hills // J. Wind Engng Industr. Aerodynamics. 1991. V. 38. P. 109–122.
14. **Morris H. M.** Flow in rough conduits // Trans. ASME. 1955. V. 120. P. 373–398.

*Поступила в редакцию 5/IV 2018 г.*

---