

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЛИЯНИЯ СКОСА ПОТОКА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛЕЙ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ ПЕРЕД ПРЯМЫМ И ЗА ОБРАТНЫМ УСТУПОМ

© 2014 г. В. Н. Бибко, А. Ю. Голубев

Научно-исследовательский Московский комплекс ЦАГИ

105005 Москва, ул. Радио 17

E-mail: alexeygolubev@yandex.ru

Поступила в редакцию 09.02.2014 г.

Проведены экспериментальные исследования влияния скоса потока на характеристики полей пульсаций давления перед прямым и за обратным уступами. Показано, что при наличии скоса потока эти поля обладают существенной неоднородностью и трехмерностью. Показано, что поле пульсаций давления характеризуется наименьшим масштабом неоднородности по линии, ортогональной кромке уступа; наибольшей степенью коррелированности и наличием конвективных свойств поля в направлении, коллинеарном направлению потока. Влияние скоса потока на масштаб неоднородности и нормированный взаимный спектр полей пульсаций давления перед прямым и за обратным уступом проявляется в меньшей степени, чем на спектральную плотность. Предложено уточнение эмпирической модели полей пульсаций давления перед прямым и за обратным уступами с учетом трехмерности полей.

Ключевые слова: пульсации давления, прямой уступ, обратный уступ, скос потока, спектральная плотность.

DOI: 10.7868/S0320791914050037

1. ВВЕДЕНИЕ

Аэродинамические пульсации давления звукового диапазона частот на обтекаемой поверхности являются основными источниками шума в салоне современного скоростного пассажирского самолета. Речь идет о пристенных пульсациях давления безградиентного и градиентного турбулентных пограничных слоев на гладкой поверхности, пульсациях давления от потока над прямыми и обратными уступами, а также пульсациях давления в области взаимодействия скачков уплотнения с турбулентным пограничным слоем.

Достоверность методов прогноза шума внутри самолета от этих источников и разработка эффективных способов его снижения существенным образом определяются объемом и достоверностью информации об основных вероятностных характеристиках этих случайных по пространству и времени полей пульсаций давления на внешней обтекаемой поверхности.

На поверхности летательного аппарата практически всегда имеются зоны, характеризующиеся мелкомасштабной геометрической неоднородностью. В качестве примера таких зон можно привести нестыковки обшивок фюзеляжа, обе-

чайки самолетных окон и т.д. Прямые и обратные уступы на поверхности фюзеляжа самолета, связанные с нюансами производства, в условиях полета порождают локальные поля пульсаций давления, интенсивность которых в звуковом диапазоне частот может существенно (в сто и более раз) превысить интенсивность турбулентных пульсаций давления на гладкой поверхности. Это приводит к тому, что шум в салоне и кабине экипажа современного скоростного самолета, который, по существу, определяется источниками, связанными с обтеканием его внешней поверхности, может заметно усилиться из-за наличия на ней уступов.

Повышение спектральной плотности пульсаций давления перед прямыми и за обратными уступами отмечалось еще в 1986 г. Фараби и Касарелла [1]. В этой работе авторы привели результаты экспериментальных исследований полей пульсаций давления перед прямым и за обратным уступом, высота которого составляла 42% от толщины пограничного слоя. Авторами отмечался низкочастотный характер спектра пульсаций давления перед прямым уступом, а также существенное повышение спектральных уровней на низких и высоких частотах за обратным уступом. Кроме того, отмечалась повышенная степень коррели-

рованности полей пульсаций давления за обратным уступом.

Подробное параметрическое изучение полей пульсаций давления перед прямым и за обратным уступами малой безразмерной высоты представлено в работах [2], [3]. В качестве параметров подобия были выбраны безразмерная (относительно толщины вытеснения пограничного слоя) высота уступа, число Маха, число Рейнольдса, расстояние от точки наблюдения до точки максимума интенсивности перед прямым и за обратным уступом. На основе применения теории подобия была предложена модель неоднородных полей пульсаций давления перед прямыми и за обратными уступами малой высоты.

Модель, предложенная в работах [2] и [3], базировалась на гипотезе двумерности поля пульсаций давления, формирующегося перед прямым и за обратным уступами. На поверхности летательного аппарата могут формироваться и трехмерные неоднородные поля пульсаций давления. Их появление может быть, в частности, обусловлено наличием значительных скосов потока в носовой зоне фюзеляжа, расположением выступов под углом в горизонтальной плоскости относительно направления потока в силу конструктивных особенностей локальных зон фюзеляжа и др.

Экспериментальных исследований полей пульсаций давления в окрестности уступов, расположенных со скосом относительно набегающего потока, практически не проводилось. К числу немногих следует отнести работу [4], в которой проведен численный расчет обтекания прямого уступа высотой в 13% от невозмущенного пограничного слоя, располагающегося под различными углами скоса.

Целью настоящей работы являлось изучение влияния угла скоса потока α (угол между направлением потока и линией в горизонтальной плоскости, ортогональной кромке выступа) на структуру полей пульсаций давления перед прямым и за обратным уступами.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальные исследования проводились на малозумной аэродинамической установке, представляющей собой канал прямоугольного поперечного сечения 22×221 мм и длиной около 3 м. Канал изготовлен из слоев фанеры толщиной 47 мм. Одна из его широких стенок имеет проем, в который можно монтировать жесткую плиту с приемниками пульсаций давления. Плита с при-

емниками пульсаций давления устанавливается строго заподлицо с гладкой внутренней стенкой канала. Внутренние поверхности рабочей части установки и входного коллектора были полированы. В коллекторе осуществлялся плавный переход от кругового сечения к прямоугольному при отношении площадей (степени поджатия потока) около 12.

Установка обеспечивается системой питания воздухом от двух центробежных вентиляторов Ц4-70, общая полезная мощность которых составляет 500 Вт. Это позволяет развивать скорость потока в канале до 39 м/с. Была предусмотрена возможность одновременного включения этих вентиляторов, а также осуществление дополнительной регулировки скорости потока посредством плавного дросселирования воздуха на входе одного из вентиляторов. Таким образом, обеспечивается полный диапазон изменения скоростей от 7 до 39 м/с. Наибольшее статическое давление, создаваемое при разрежении, составляло 880 Па.

В эксперименте использовалась линейка из приемников пульсаций давления, в качестве которых были выбраны миниатюрные датчики фирмы ENDEVCO 8514-10, диаметр чувствительного элемента которых составлял 1.63 мм. Датчики устанавливались строго заподлицо с обтекаемой поверхностью. В измерениях использовались десять приемников пульсаций давления. Девять датчиков были установлены в единой обойме и размещены друг от друга на 3 мм. Десятый датчик располагался на расстоянии 6 мм от девятого датчика.

Сигналы с первых восьми датчиков поступали на входной усилитель платы АЦП-1. Сигналы с восьмого по десятый датчик поступали на входной усилитель платы АЦП-2. В эксперименте использовались две платы АЦП фирмы National Instruments. Регистрация экспериментальных данных осуществлялась с частотой оцифровки 60000 значений в секунду, фильтр низких частот был установлен на частоте 25 кГц. Последующий спектральный и корреляционный анализ осуществлялся в частотном диапазоне от 0 до 20000 Гц. С помощью специально разработанного программного обеспечения определялись как узкополосные, так и 1/3-октавные спектральные уровни, а также узкополосные действительная и мнимая части взаимного спектра, с последующим их осреднением в третьоктавных полосах частот.

Для экспериментальных исследований была изготовлена модель выступа из алюминиевого сплава. Высота выступа составляла 1.8 мм, его ширина — 25 мм (в направлении потока при угле скоса 0°), а длина — 125 мм. Модель выступа на-

клеивалась на поворотный диск, что позволяло определять пульсации давления при различных углах скоса потока (при одном и том же положении линейки приемников относительно выступа) в процессе одного измерения.

3. КРИТЕРИИ ПОДОБИЯ И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ

При анализе экспериментальных данных пульсаций давления перед прямым и за обратным уступами на основе теории подобия выбирается система параметров, с помощью которых обычно описываются состояние среды и свойства течений без теплообмена [2]. Такими параметрами являются: плотность ρ , коэффициент кинематической вязкости ν , газовая постоянная R , удельная теплоемкость газа c_v , скорость свободного потока U , температура торможения T_0 и толщина вытеснения пограничного слоя δ^* непосредственно перед областью взаимодействия турбулентного пограничного слоя с прямым и обратным уступами. Система параметров включает также высоту уступа h , продольную координату x и угловую частоту ω , характеризующие соответственно геометрию, пространственную неоднородность поля пульсаций давления в области взаимодействия и нестационарный характер движения. Теория размерностей позволяет представить спектральную плотность $\Phi(\omega)$ как функцию пяти параметров подобия:

$$\frac{\Phi(\omega)U}{q^2h} = F(M, Re, h/\delta^*, x/h, Sh),$$

где q – скоростной напор. Безразмерная спектральная плотность представляется функцией числа Струхала $Sh = \frac{\omega h}{U}$, зависящей как от параметров от числа Маха M , числа Рейнольдса Re , h/δ^* , x/h . Таким образом, в фиксированных сечениях области воздействия $x/h = \text{const}$ спектры пульсаций давления имеют такие же условия подобия, что и осредненные характеристики при обтекании уступов: $M = \text{const}$, $Re = \text{const}$, $h/\delta^* = \text{const}$.

В работах [2], [3] для произвольных точек наблюдения (x_1, x_2) и (x'_1, x'_2) было предложено следующее мультипликативное представление спектра пространственных корреляций пристенных пульсаций давления перед прямым и за обратным уступами:

$$\begin{aligned} \Phi_1(x_1, x'_1, x_2, x'_2, \omega) = & \\ = \Phi_m(\omega) \exp\left(-\frac{(|x'_1 - x_{1m}| + |x_1 - x_{1m}|)}{2L}\right) \times & \\ \times \exp\left(-\frac{2|x'_1 - x_1|}{[\Lambda_1(x'_1) + \Lambda_1(x_1)]}\right) \times & \quad (1) \\ \times \exp\left(-\frac{2|x'_2 - x_2|}{[\Lambda_2(x'_1) + \Lambda_2(x_1)]}\right) \times & \\ \times \exp\left(-\frac{2i\omega(x'_1 - x_1)}{[U_{ph}(x'_1) + U_{ph}(x_1)]}\right). & \end{aligned}$$

Здесь $\Phi_m(\omega)$ – спектральная плотность пристенных пульсаций давления в точке максимума их интенсивности x_{1m} на частоте ω . Первый экспоненциальный множитель описывает спад интенсивности пульсаций давления относительно максимальной величины; второй – корреляцию спектральных составляющих в двух точках наблюдения в направлении потока, третий – корреляцию в ортогональном направлении, а четвертый – конвективные свойства поля в направлении потока.

Параметры в выражении (1), с помощью которых описывается неоднородное поле пульсаций давления перед прямым и за обратным уступами, определяются соотношениями:

– масштаб неоднородности, описывающий пространственное изменение спектральной плотности пульсаций давления при удалении точки наблюдения от точки максимума интенсивности:

$$L(Sh) = \int_0^\infty \frac{\Phi(x_1, Sh)}{\Phi_m(Sh)} dx_1, \quad (2)$$

– локальные масштабы корреляции, необходимые для оценки степени пространственной взаимосвязи неоднородного поля пульсаций давления в конкретных областях зоны взаимодействия, задаются в зависимости от точки наблюдения (x_1, x_2) и (x'_1, x'_2) , их пространственного разнесения $\xi_1 = x'_1 - x_1$, $\xi_2 = x'_2 - x_2$ и нормированного взаимного спектра $\varphi(\xi, \omega) = \Phi(\xi, \omega)/\Phi(\omega)$:

$$\begin{aligned} \Lambda_1(x_1, \omega) = -\frac{\xi_1}{\ln(|\varphi(x_1, x_2, \xi_1, \omega)|)}, \\ \Lambda_2(x_1, \omega) = -\frac{\xi_2}{\ln(|\varphi(x_1, x_2, \xi_2, \omega)|)}. \end{aligned}$$

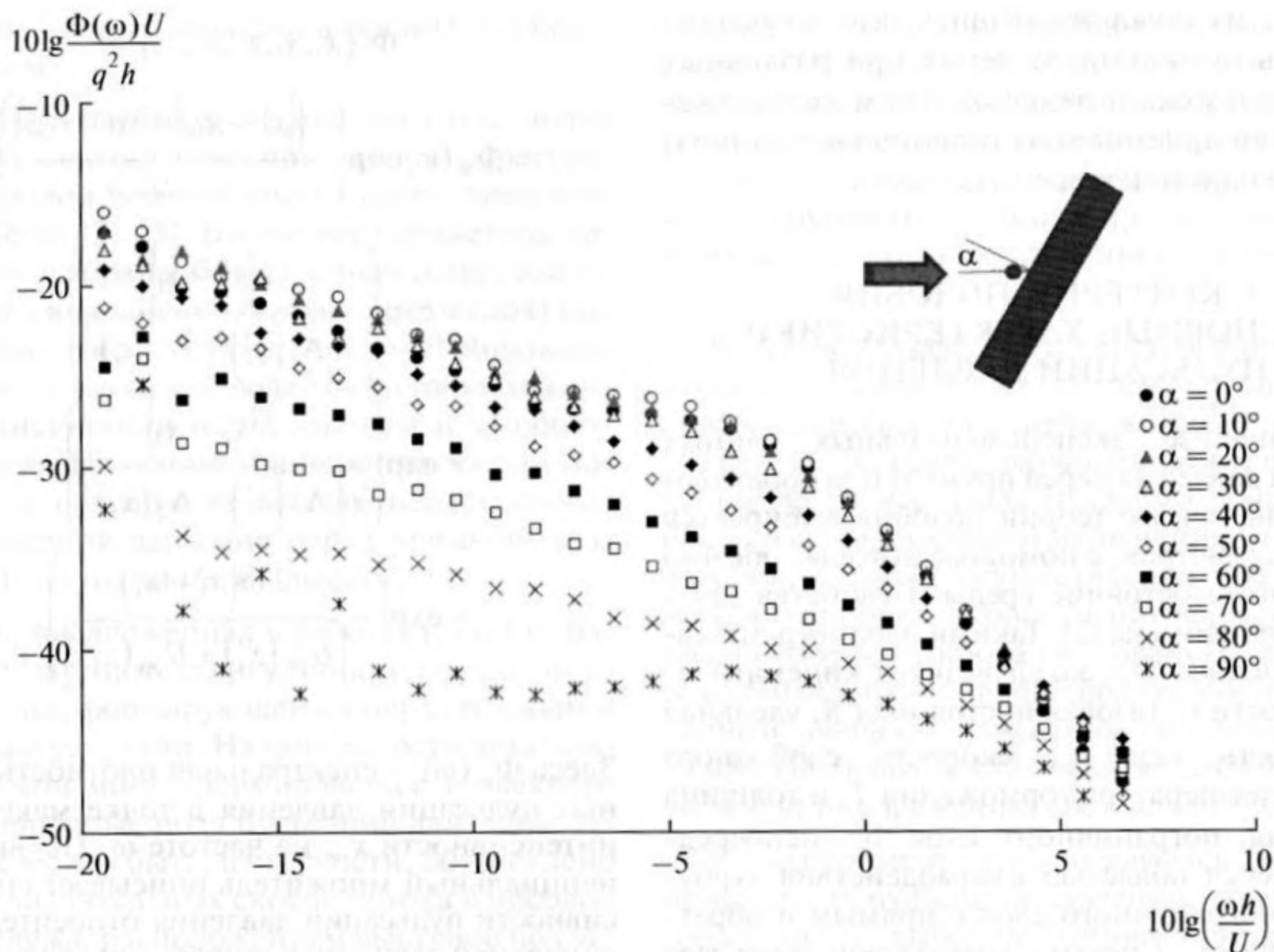


Рис. 1. Влияние угла склоа потока на интенсивность пульсаций давления непосредственно перед уступом ($x/h = \min$).

Кроме того, в данной работе используется интегральный масштаб корреляции, определяемый в зависимости от направления \mathbf{n} :

$$\Lambda_n = \int_0^{\infty} |\varphi(\xi_n, \omega)| d\xi_n.$$

Локальная фазовая скорость U_{ph} , с помощью которой определяются конвективные свойства поля пульсаций давления, определяется выражением

$$U_{ph}(x_1, x_2, \omega) = \frac{\omega \xi_1}{\arg \varphi(x_1, x_2, \xi_1, \omega)}.$$

В работах [2, 3] отмечено, что зависимости от чисел Рейнольдса и Маха в области $M \leq 0.8$ в характеристиках изолированных полей пульсаций давления перед прямым и за обратным уступами практически не обнаруживаются. Это позволяет существенно упростить экспериментальную задачу. При этом можно ограничиться экспериментальными исследованиями при малой скорости потока и при малых числах Рейнольдса.

Непосредственное применение эмпирической модели для рассматриваемых трехмерных полей пульсаций давления на основе выражения (1) затруднительно. Возможность его использования

может быть доказана на основе проведения дополнительных экспериментальных исследований структуры полей пульсаций давления перед прямым и за обратным уступом при наличии склоа потока.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Результаты экспериментальных исследований полей пульсаций давления перед прямым уступом в диапазоне углов склоа от 0° (без склоа) до 70° показывают, что максимум интенсивности пульсаций давления локализуется в области, непосредственно прилегающей к уступу ($x/h = \min$). Расположение максимума интенсивности поля пульсаций давления за обратным уступом в том же диапазоне углов склоа потока локализуется в окрестности пяти высот уступа.

На рис. 1 представлено влияние угла склоа потока на максимальную интенсивность поля пульсаций давления перед прямым уступом. Как видно из рис. 1, увеличение угла склоа потока вплоть до $\alpha = 30^\circ$ не оказывает заметного влияния на интенсивность пульсаций давления непосредственно перед уступом (в пределах 1 дБ). Дальнейшее

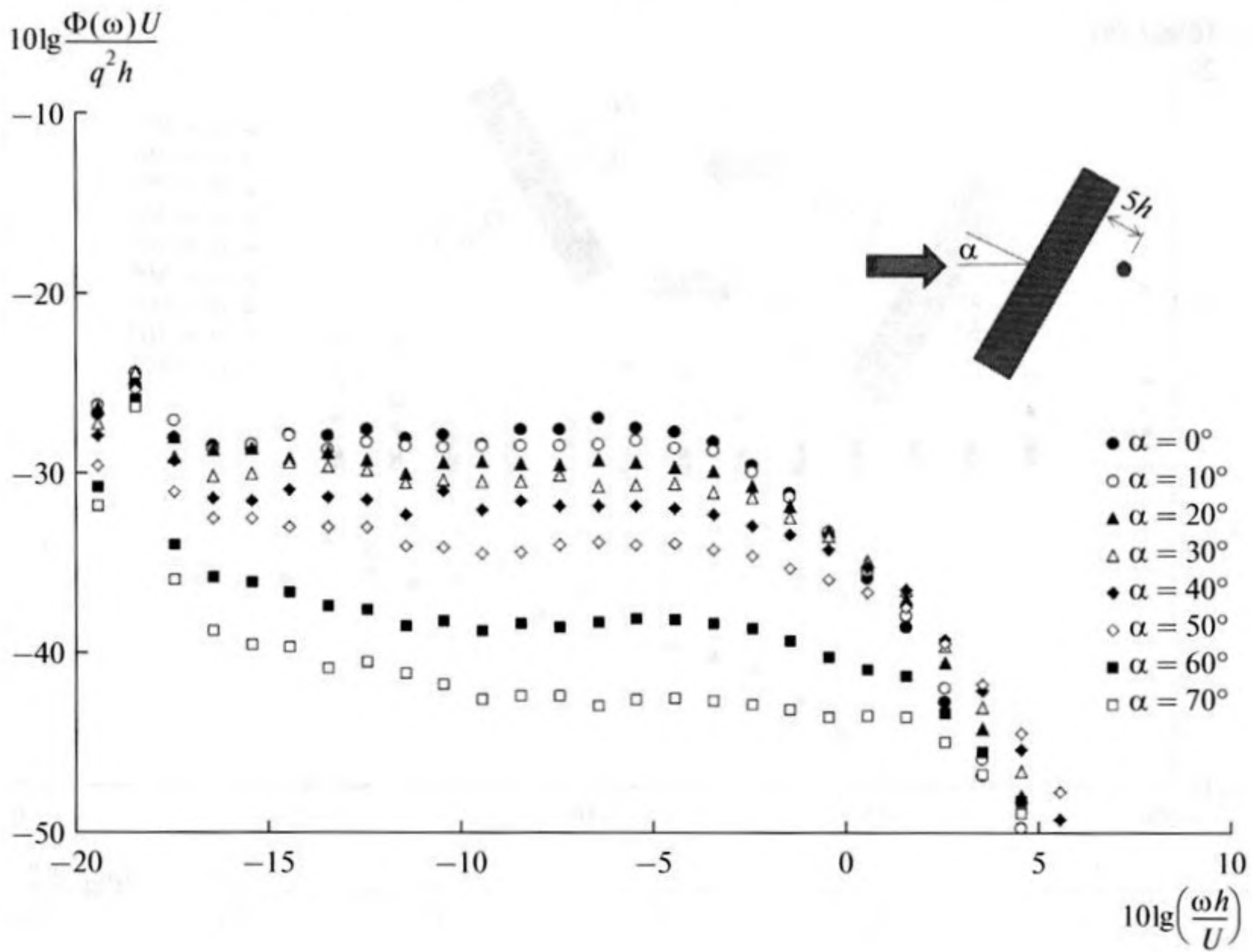


Рис. 2. Влияние угла скоса потока на интенсивность пульсаций давления в зоне присоединения за уступом ($x/h \approx 5$).

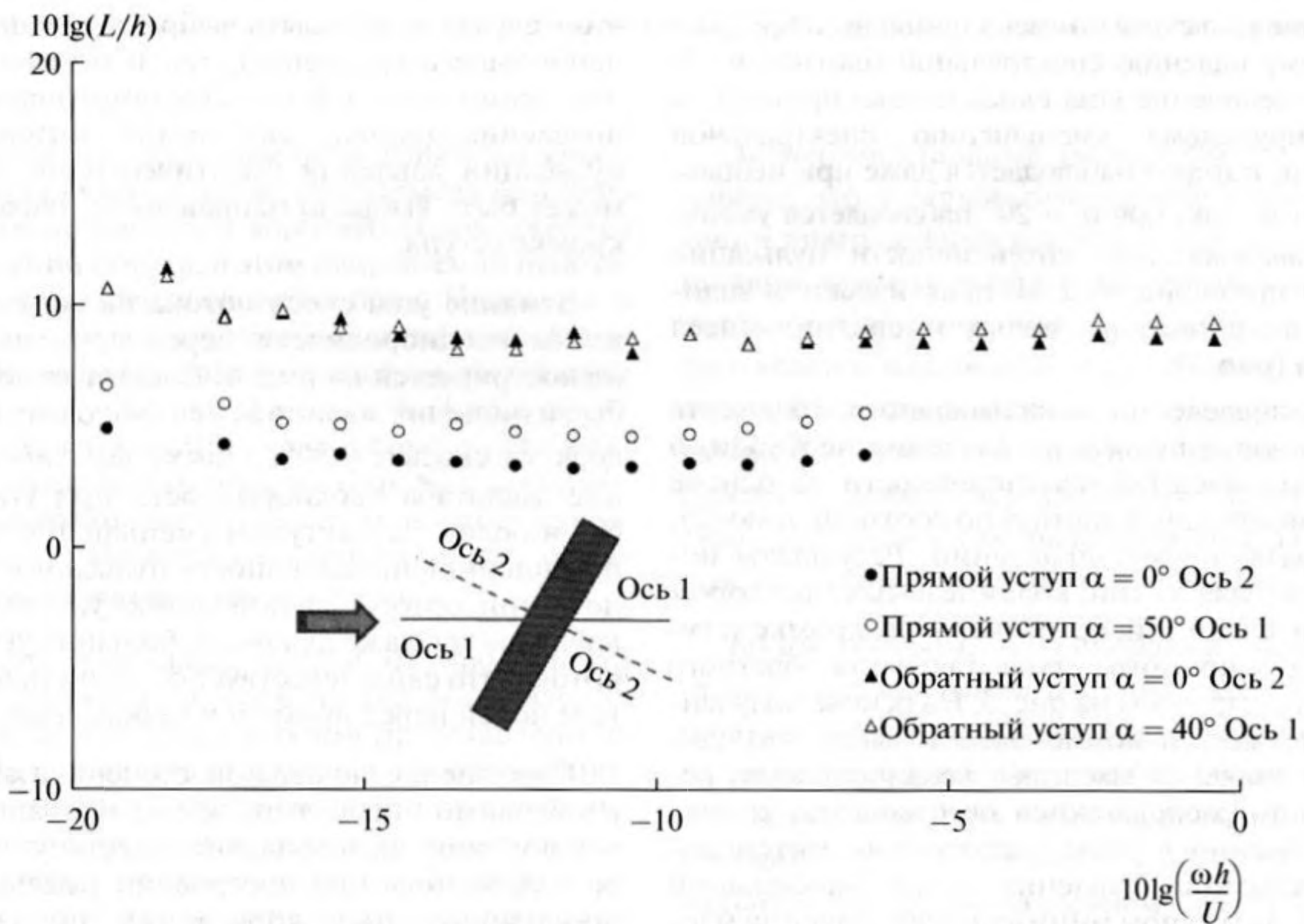


Рис. 3. Масштабы неоднородности перед прямым и за обратным уступами для различных направлений.

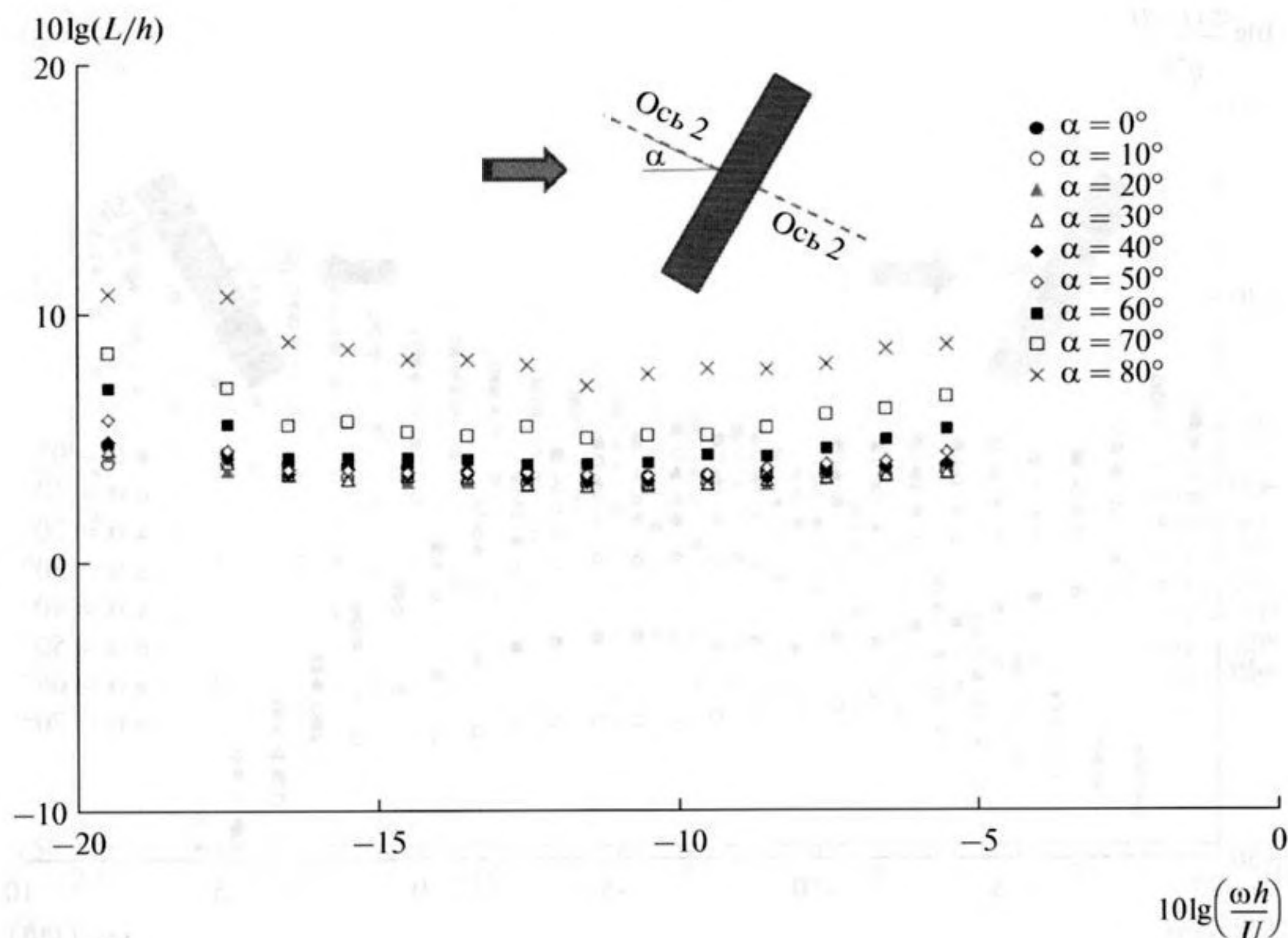


Рис. 4. Влияние скоса потока на масштаб неоднородности перед прямым уступом.

увеличение угла скоса потока α приводит к прогрессирующему падению спектральной плотности. За уступом увеличение угла скоса потока приводит к прогрессирующему уменьшению спектральной плотности, которое наблюдается даже при небольших углах α . Так, при $\alpha = 20^\circ$ наблюдается уменьшение максимальной интенсивности пульсаций давления примерно на 2 дБ практически эквидистантно по диапазону малых и средних чисел Струхаля (рис. 2).

Для определения максимального градиента интенсивности пульсаций давления необходимо определить масштаб неоднородности на основе экспериментальных данных по соотношению (2), но для различных направлений. Результаты исследований для линий, коллинеарных с вектором потока, и для линий, ортогональных кромке уступа, как для прямого уступа, так и для обратного уступа, представлены на рис. 3. На основе полученных зависимостей можно сделать вывод, что наименьшие значения масштаба неоднородности перед уступом располагаются ортогонально кромке уступа. Именно в этом направлении интенсивность пульсаций давления имеет наибольший градиент. За уступом минимальные значения масштаба неоднородности наблюдаются как по линии, ортогональной кромке уступа (которая и в

этом случае может быть выбрана за направление наибольшего градиента), так и по линии в направлении потока. В качестве ортогонального направления (вдоль этих линий интенсивность пульсаций давления практически не меняется) может быть выбрано направление, параллельное кромке уступа.

Влияние угла скоса потока на величину масштаба неоднородности перед прямым уступом иллюстрируется на рис. 4. Следует отметить слабые изменения масштаба неоднородности вплоть до углов скоса $\alpha = 50^\circ$, а также заметное увеличение масштаба неоднородности при углах скоса 60° и более. За выступом уменьшение градиента повышенной интенсивности пульсаций давления по линии, ортогональной кромке уступа, также не наблюдается даже для очень больших углов скоса потока, что свидетельствует об устойчивом характере полей перед прямым и за обратным уступом.

При оценке локальной степени взаимосвязи необходимо определить, какое направление (по потоку или ортогонально выступу) является определяющим при построении модели спектра пространственных корреляций по соотношению (1) при наличии скоса потока. Так, на рис. 5 в качестве иллюстрации представлены интеграль-

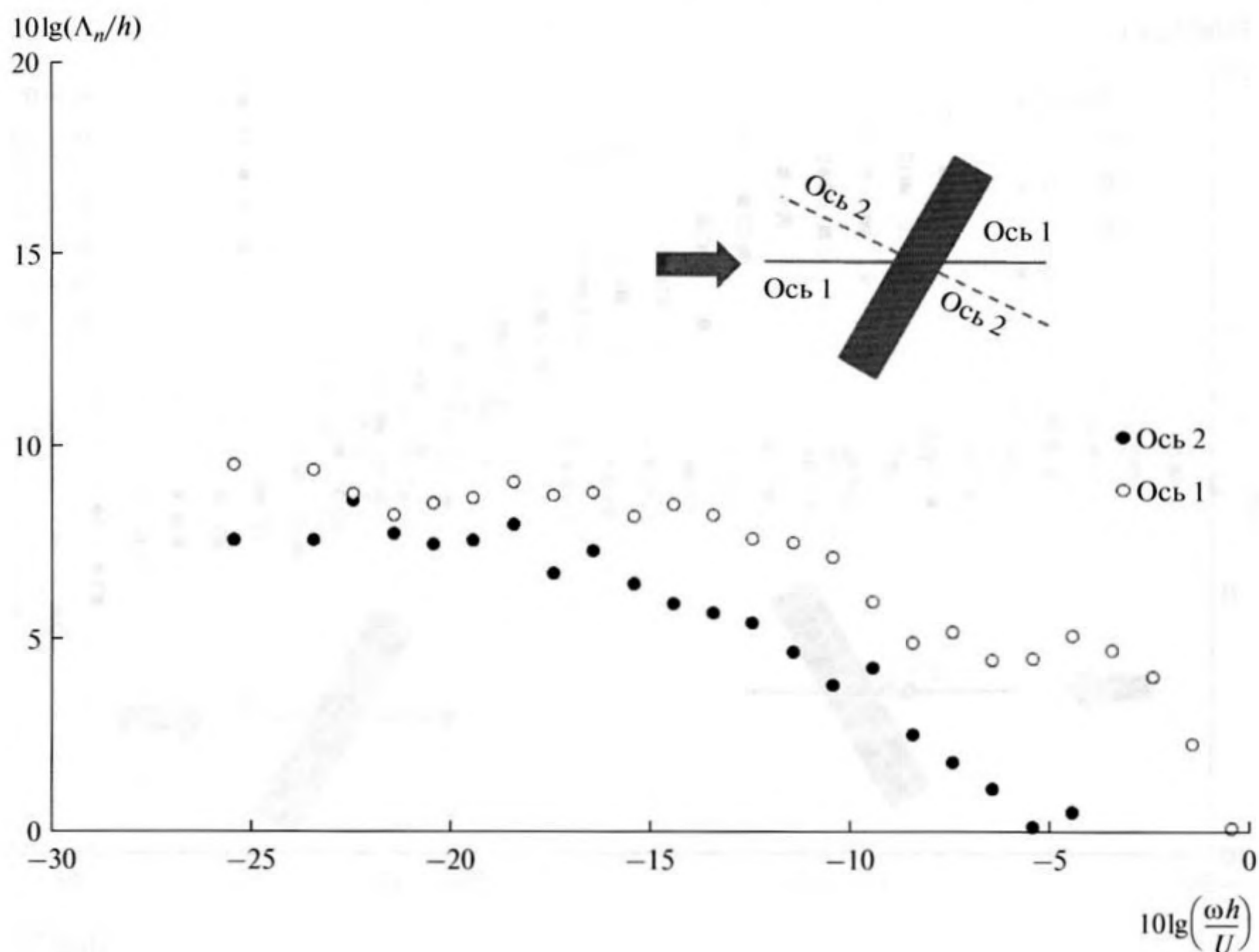


Рис. 5. Иллюстрация максимальных значений интегрального масштаба корреляции в направлении потока перед прямым уступом.

ные масштабы корреляции поля пульсаций давления перед прямым уступом. Наибольшая величина интегрального масштаба корреляции локализуется в направлении потока, в этом направлении отмечаются и конвективные свойства поля. Напротив, в ортогональном потоку направлении конвективные свойства поля практически отсутствуют даже при больших углах скоса потока α . Таким образом, для степени взаимосвязи в потоке при обтекании прямых и обратных уступов со скосом может быть выбрана ортогональная система координат — ось x_1 направлена по потоку, другая ось x_2 ортогональна направлению потока.

Влияние угла скоса потока на продольный масштаб корреляции поля пульсаций давления непосредственно перед уступом представлено на рис. 6. Можно видеть, что угол скоса потока приводит к некоторому увеличению степени взаимосвязи в потоке (в направлении потока) непосредственно перед прямым уступом. За обратным уступом (рис. 7) увеличение угла скоса потока от 0° до 60° приводит к снижению продольной коррелированности примерно в 1.5 раза.

Экспериментальные результаты также показывают, что в первом приближении при определении диагональных взаимных спектров при обтекании прямых и обратных уступов со скосом потока в диапазоне чисел Струхалия, в котором проявляется взаимодействие потока с уступами, может быть применена гипотеза мультипликативности, в отличие от полей пульсаций давления невозмущенного турбулентного пограничного слоя, для которых больше подходит эллиптическое представление взаимного спектра [5, 6].

Таким образом, на основании экспериментальных исследований влияния скоса потока на характеристики полей пульсаций давления перед прямым и за обратным уступами для определения спектра пространственных корреляций в системе координат (x_1, x_2) , связанной с потоком и ортогональным потоку направлением, может быть принята эмпирическая модель в виде, аналогичном выражению (1):

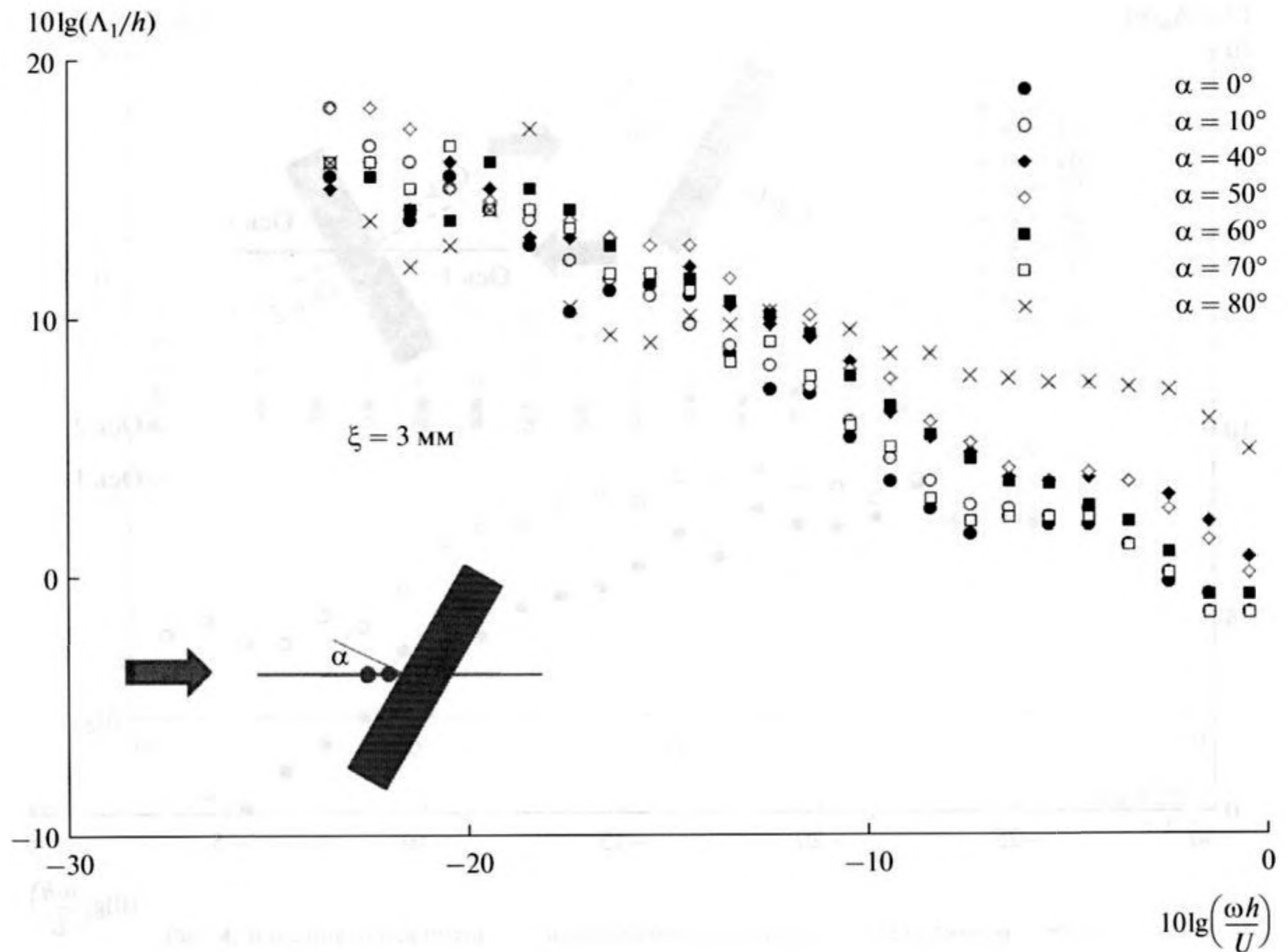


Рис. 6. Влияние угла скоса потока на продольную коррелированность поля перед прямым уступом.

$$\begin{aligned} \Phi_1(x_1, x_1', x_2, x_2', \omega) = & \\ = \Phi_m(\omega) \exp & \left(- \frac{(|x_{1s}' - x_{1ms}| + |x_{1s} - x_{1ms}|)}{2L_s} \right) \times \\ & \times \exp \left(- \frac{2|x_1' - x_1|}{[\Lambda_1(x_1') + \Lambda_1(x_1)]} \right) \times \\ & \times \exp \left(- \frac{2|x_2' - x_2|}{[\Lambda_2(x_1') + \Lambda_2(x_1)]} \right) \times \\ & \times \exp \left(- \frac{2i\omega(x_1' - x_1)}{[U_{ph}(x_1') + U_{ph}(x_1)]} \right). \end{aligned} \quad (3)$$

В данном выражении члены с индексами *s* определяются в системе координат, связанной с уступом:

$$|x_{1s} - x_{1ms}| = |x_1 - x_{1m}| \cos \alpha + |x_2 - x_{2m}| \sin \alpha,$$

L_s — масштаб неоднородности ортогонально кромке уступа.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, поле пульсаций давления перед прямым и за обратным уступами при наличии скоса потока обладает существенной неоднородностью и трехмерностью. Увеличение угла скоса потока от 0° до 30° приводит к незначительному уменьшению спектральной плотности (1 дБ) уровней пульсаций перед прямым уступом и на 2–3 дБ за обратным уступом; дальнейшее увеличение угла скоса приводит к существенному уменьшению интенсивности пульсаций давления. Поле пульсаций давления характеризуется наименьшим масштабом неоднородности по линии, ортогональной кромке уступа, наибольшей степенью коррелированности и конвективными свойствами поля в направлении, коллинеарном направлению потока; в ортогональном потоку направлении конвективные свойства поля практически отсутствуют. Влияние скоса потока на масштаб неоднородности и нормированный вза-

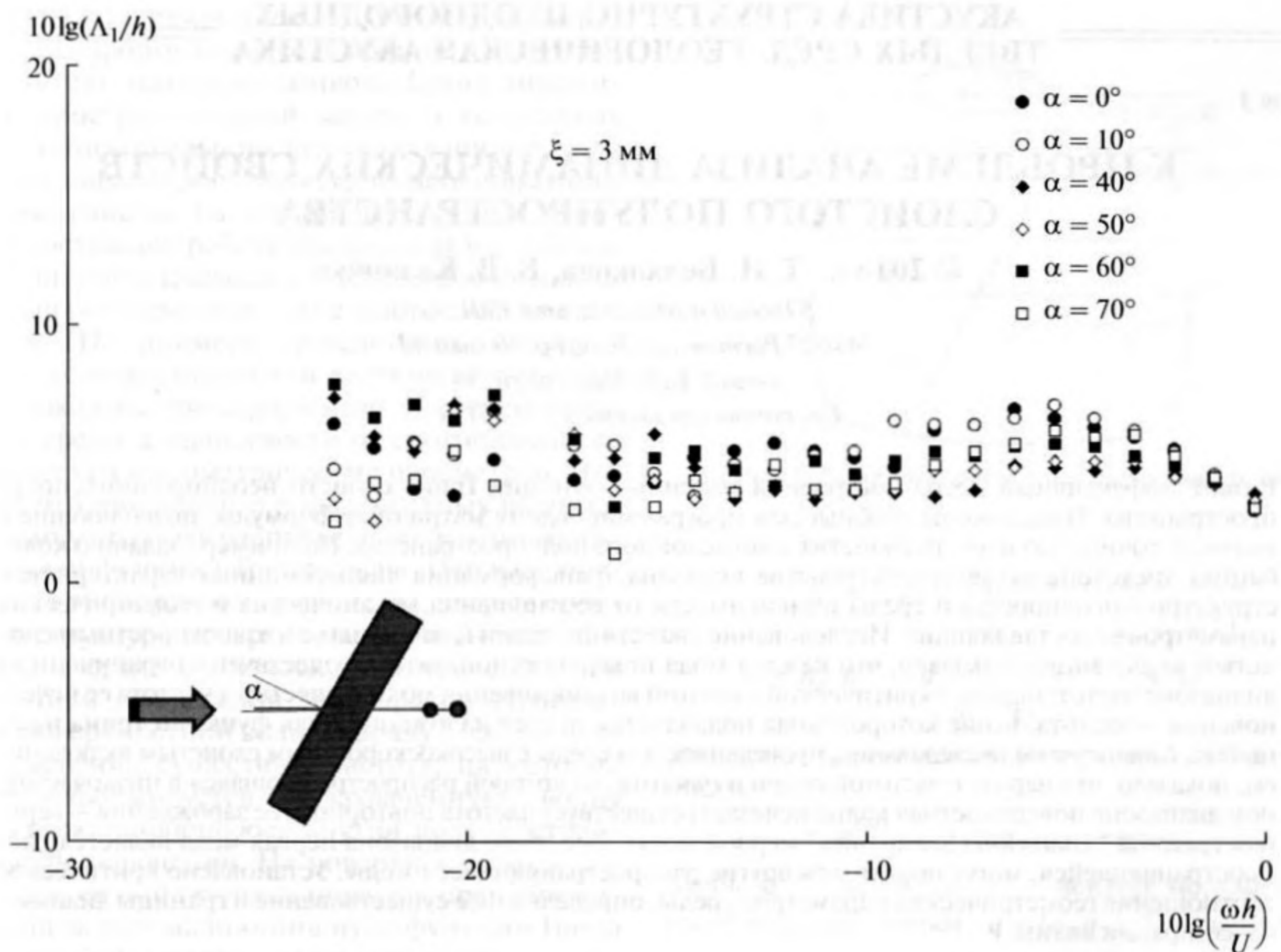


Рис. 7. Влияние угла скоса потока на продольную коррелированность поля за обратным уступом.

имный спектр полей пульсаций давления перед прямым и за обратным уступом проявляется в меньшей степени, чем на спектральную плотность. Предложено уточнение эмпирической модели полей пульсаций давления перед прямым и за обратным уступами с учетом трехмерности полей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Farabee T.M., Casarella M.J. Measurements of fluctuating wall pressure for separated/reattached boundary layer flows // ASME Journal of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design. 1986. V. 108. № 2. P. 301–307.
2. Efimtsov B.M., Kozlov N.M., Kravchenko S.V., Andersson A.O. Wall pressure fluctuation spectra at small forward facing steps // AIAA Paper 99–1964, 1999.
3. Efimtsov B.M., Kozlov N.M., Kravchenko S.V., Andersson A.O. Wall pressure fluctuation spectra at small backward facing steps // AIAA Paper 2000–2053, 2000.
4. Hao J., Wang M. Flow noise from swept steps in turbulent boundary layers // AIAA 2013–2248, 2013.
5. Зверев А.Я., Ефимцов Б.М. Сравнительная оценка акустического излучения тонкостенных конструкций, возбуждаемых турбулентным пограничным слоем, для различных представлений взаимного спектра // Акуст. журн. 2012. Т. 58. № 4. С. 459–464.
6. Кудашев Е.Б., Колюшницын В.А., Маршов В.П., Ткаченко В.М., Цветков А.М. Экспериментальное моделирование гидродинамических шумов обтекания на автономной морской лаборатории // Акуст. журн. 2013. Т. 59. № 2. С. 211–221.