

В настоящее время турбулентное движение жидкости является весьма привлекательной темой для исследователей, и в то же время ее изучение все еще остается сложной научно-технической проблемой. В экспериментальном плане изучение турбулентности окончательно не завершено из-за отсутствия достоверных методов и инструментария с высокой разрешающей способностью и быстродействием, которые могли бы фиксировать сложную структуру течения. С другой стороны решения универсальных уравнений Навье-Стокса слишком сложны для использования при моделировании [1]. Не смотря на это, турбулентность является объектом обширных исследований, проводимых теми, кто не хочет ждать, когда фундаментальная наука даст ответы на многие поставленные вопросы. Фактически этот вид исследования является доминирующим. Однако получение эмпирических знаний о явлении – занятие дорогостоящее. Многие институты и коммерческие организации, занимающиеся проблемами экологии и гидродинамики, выделяют большие средства на конструирование датчиков и других приборов для экспериментального исследования свойств турбулентности. Но все равно количество морских экспериментов мало, и для уверенной инженерной интерпретации получаемых результатов желательно иметь модельные сигналы, которые можно было бы обрабатывать точно так же, как и натурные, но в объемах достаточных для исключения эффекта случайности. Основная цель – получить модельный сигнал с характеристиками, близкими к натурным экспериментам. На рисунке 1 показаны спектры мощности для различных физических ситуаций [2].

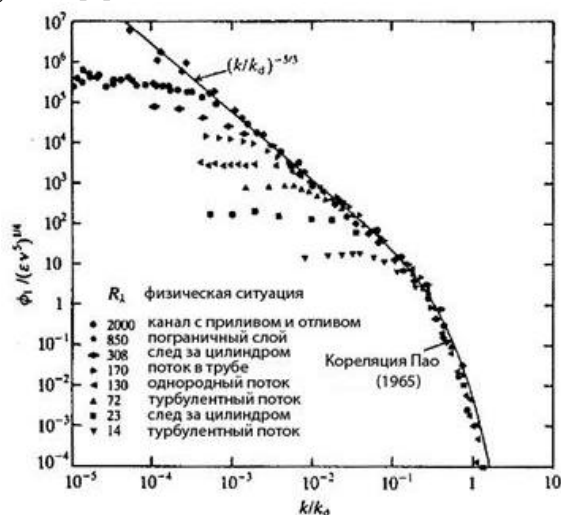


Рисунок 1 – Измеренные одномерные спектры для широкого диапазона чисел Рейнольдса и физических ситуаций

Существует большое количество методов моделирования сигналов, регистрируемых в различных сложных системах или получаемых при исследовании каких-либо физических процессов. В инженерных приложениях можно, в принципе, считать сигналы или стационарными, или кусочно-стационарными с известными законами распределения и спектрально-корреляционными характеристиками [3]. Такой подход применим и для моделирования локально-изотропной турбулентности, у которой большое количество дроблений вихрей полностью "стерло" информацию о первичной причине явления и флуктуации гидрофизических полей можно рассматривать как стационарные случайные процессы с соответствующими спектрами мощности [4]. Однако когда необходимо работать с масштабами близкими к интервалу энергоснабжения, необходимо учитывать эффекты анизотропии, то есть особенности формирования вихрей, близких по размерам к "изначальным". В случае получения случайного процесса стандартными методами (считая сигнал кусочно-стационарным) действительно можно добиться как нормального закона распределения, так и требуемого спектра мощности в определенном диапазоне частот [5], кроме того такой алгоритм достаточно просто реализуется и быстро выдает результат. Но стандартные методы моделирования случайных процессов не могут позволить получить случайный процесс с характеристиками анизотропной турбулентности [6].

Существует и другой способ моделирования подобного рода сигнала – воспроизводя вихревую структуру течения. Течение можно представить в виде полосы конечной ширины, вся область которой равномерно заполнена вихрями различных масштабов различным образом ориентированных

(рисунок 2). Вихри сдвинуты друг относительно друга случайным образом. Скорость течения жидкости (на рисунке обозначено стрелкой, может быть противоположным) в вихре и их количество на единице площади зависит от размера вихря.

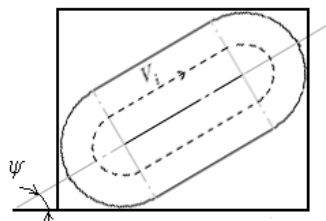


Рисунок 2 – Плоский вихрь в общем случае

При таком способе моделирования турбулентного поля учитывается вихревая структура поля и ориентация вихрей в пространстве. Кроме того, для исключения эффекта эллайзинга при построении спектра, необходимо моделировать сигнал с шагом дискретизации вдвое меньшим выводимой на графике частоты [7]. Очевидно, что затраты как временные, так и ресурсов ЭВМ, при этом будут потребляться значительно больше, однако полученные спектральные характеристики (на рисунке 3 спектр сигнала, пропущенный через окно Ханнинга [8]) вполне согласуются с экспериментальными данными. (На всех графиках отчетливо видны низкочастотная анизотропная область, изотропная область с наклоном " $-5/3$ " и высокочастотная область диссипации с наклоном порядка " -4 ".)

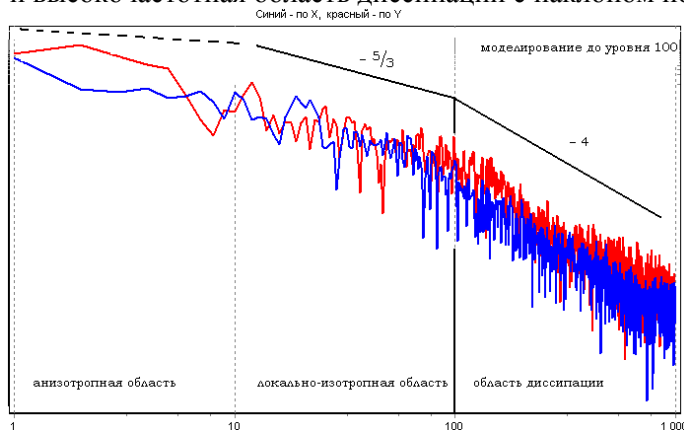


Рисунок 3 – Спектр мощности сигнала, моделируемого воспроизводя вихревую структуру течения

Таким образом, предложенный механизм моделирования сигналов способен воспроизводить случайные процессы не хуже классических методов. Он дает те же результаты для участков изотропности и диссипации, а, кроме того, позволяет сопоставлять установки параметров используемых в модели вихрей с полученными спектральными характеристиками, исходя из чего можно строить гипотезы о реальной структуре турбулентного поля; показывает от вихрей какого масштаба, какой формы и ориентации были получены те или иные экспериментальные характеристики; оставляет широкий простор для исследования с целью выявления закономерностей анизотропии в низкочастотной области, уточнения самой модели турбулентного поля для более качественного описания структуры природного явления.

Библиографический список

1. Кочетков Ю. Турбулентность жидкости, газа и плазмы // Двигатель. – 2005. – № 3 (39) – с. 45-49
2. Хлопков Ю.И., Жаров В.А., Горелов С.Л. Лекции по теоретическим методам исследования турбулентности. – М.: Изд-во МФТИ, 2005. – 197 с.
3. Емельянов В.Ю. Методы моделирования стохастических систем управления. – СПб: Изд-во БГТУ, 1997. – 134 с.
4. Фриш У. Турбулентность. Наследие Колмогорова. – М.: ФАЗИС, 1998, 346 с.
5. Шапоров С.Д. Прикладная статистика. – СПб: СММО Пресс, 2003. – 254 с.
6. Теория сигналов [Электронный ресурс] / СеогТУ – 2008. – URL: <http://www.signalstheory.ru>
7. Грибанов Ю.И., Мальков В.Л. Спектральный анализ случайных процессов. – М.: Энергия, 1974. – 240 с.
8. Fredrick J. Harris, On the Use of Windows for Harmonic Analysis with the Discrete Fourier Transform, Proc. IEEE, Vol. 66, No. 1, 1978 pp. 51-83.