

УДК 532.582+532.517.4+627.157

Г. М. Дормостученко
В. П. Петров**ОБ ИССЛЕДОВАНИИ ТУРБУЛЕНТНОГО
ВЗВЕСЕНЕСУЩЕГО ПОТОКА
ПУТЕМ ПОСТРОЕНИЯ
АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНОЙ
ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМЫ
СКОРОСТЬ — МУТНОСТЬ**

Взаимодействие полей скорости и мутности взвесенесущего потока рассматривается на базе статистической идентификации динамических систем. Указывается, что амплитудно-частотная характеристика системы скорость — мутность представляет дополнительную информацию о влиянии пульсаций скорости потока на пульсацию мутности на разных частотах.

Одна из существенных трудностей, возникающих при теоретическом изучении турбулентных взвесенесущих потоков, связана с учетом воздействия, которое оказывают взвешенные частицы на кинематику потока. Ввиду этого в некоторых теориях движения взвешенных в потоке частиц рассматриваются потоки с низкой концентрацией мелких частиц, что позволяет пренебрегать как влиянием частиц на структуру потока, так и взаимодействием частиц при их возможных столкновениях. Это относится, например, к широко распространенной диффузионной теории движения взвешенных наносов, а также к теории, разработанной в [1, 2].

Одной из первых теорий, в которой было учтено воздействие взвешенных частиц на поток, надо считать гравитационную теорию М. А. Великанова [3]. Более полное освещение этот вопрос получил в работах Г. И. Баренблатта [4, 5]. В частности, один из выводов, следующих из уравнений Баренблатта, состоит в том, что при значительном содержании взвешенных наносов, а также при их большой крупности интенсивность пульсаций скорости в потоке снижается, т. е. взвешивание частиц происходит в основном за счет энергии пульсационного движения. Вместе с тем в литературе приводятся данные, свидетельствующие о возрастании пульсаций при наличии взвеси [6].

В целом же вопрос о влиянии взвешенных частиц на кинематическую структуру потока, как отмечено в работе [7], следует связать с развитием экспериментального изучения взвесенесущих потоков.

К настоящему времени уже накоплен большой материал, полученный как в лабораторных, так и натуральных условиях о взаимодействии жидкой и твердой фазы взвесенесущего потока [6, 8, 9, 10].

Важно отметить, что обработка и анализ экспериментальных исследований проводятся, как правило, на базе корреляционного и спектрального анализа случайных полей скорости и мутности, что соответствует современным представлениям о турбулентном потоке. В монографии [11] подчеркнуто, что теория турбулентности по самому своему существу не может не быть статистической, и поэтому математическим аппаратом, нужным для логически аккуратного построения этой теории, является теория случайных полей. И если теория случайных полей еще недостаточно используется в прикладных науках, в частности в теории

турбулентного взвесенесущего потока, то это связано с тем, что она представляет собой сравнительно недавно возникший раздел теории вероятностей. Поскольку поле скорости и поле мутности турбулентного взвесенесущего потока являются собой примеры случайных полей пространственно-временного аргумента, то один из возможных методов исследования взаимодействия этих полей может быть проведен на основе статистической идентификации динамических систем.

Методы идентификации позволяют установить зависимость между функциями на входе и выходе системы, когда оператор системы неизвестен. В частности, если функции являются случайными, то необходимо применение методов статистической идентификации [12, 13].

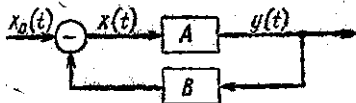


Рис. 1. Схема взаимодействия процессов скорость — мутность в турбулентном взвесенесущем потоке

Поскольку при заданных гидравлических характеристиках потока и частиц поле мутности в основном определяется полем скорости потока, то взаимодействие этих полей может быть представлено в виде динамической системы, имеющей направленность действия от скорости к мутности. Рассматриваемая система

должна также содержать звено обратной связи, выражающее факт воздействия поля мутности на поле скорости. Схематическое представление описанной динамической системы при фиксированных пространственных координатах дано на рис. 1, где $x_0(t)$ — скорость потока, $X(t)$ — скорость взвесенесущего потока, $y(t)$ — мутность, A — оператор, определяющий преобразование функций $x(t)$ в функции $y(t)$, B — оператор звена обратной связи.

В каждой фиксированной точке потока функции $x(t)$ и $y(t)$ представляют собой случайные функции временного аргумента, причем если турбулентный поток рассматривается в установившемся в вероятностном смысле состоянии, то эти случайные функции можно считать стационарными и стационарно связанными в широком смысле¹.

Если исследуемая динамическая система является линейной, то исчерпывающей характеристикой ее в частотной области является амплитудно-фазовая частотная характеристика, которая в дальнейшем будет коротко именоваться частотной характеристикой и обозначаться $H_{xy}(i\omega)$, (где $i = \sqrt{-1}$, ω — круговая частота). Функция $H_{xy}(i\omega)$ определяет изменение амплитуды и фазы выходного процесса в установившемся режиме при приложении на входе гармонического воздействия. Знание частотной характеристики системы позволяет определить реакцию системы на любое допустимое входное возмущение [12, 14].

Частотная характеристика линейной системы может быть легко определена известными методами [12, 14], если известна система уравнений, описывающих связь процессов на входе и выходе системы, либо если на входе системы возможно формирование сигнала в виде гармо-

¹ Случайный процесс $x(t)$ называется стационарным, если

$$M[x(t)] = \text{const} \text{ и } K_x(t_1, t_2) = K_x(t_2, t_1),$$

где M — символ взятия математического ожидания, а K — символ корреляционной функции. Стационарные случайные процессы $x(t)$ и $y(t)$ называются стационарно связанными в широком смысле, если их взаимная корреляционная функция зависит от разности аргументов, т. е.

$$K_{xy}(t_1, t_2) = K_{xy}(t_2, t_1).$$

нического колебания, либо в виде дельта-импульса. В противном же случае реальная динамическая система аппроксимируется такой линейной системой-моделью, которая в некотором смысле является наилучшим приближением реальной системы. Частотная характеристика линейной системы-модели наилучшего приближения может быть определена путем решения так называемого уравнения идентификации. Приведем две формы уравнения идентификации:

$$S_y(\omega) = |H_{xy}(i\omega)|^2 S_x(\omega), \quad (1)$$

$$S_{xy}(i\omega) = H_{xy}(i\omega) S_x(\omega), \quad (2)$$

где $S_x(\omega)$ и $S_y(\omega)$ — спектральные плотности входного и выходного процессов, $S_{xy}(i\omega)$ — взаимная спектральная плотность входного и выходного процессов.

Как следует из приведенных уравнений, для получения модуля частотной характеристики достаточно располагать спектральными плотностями входного и выходного процессов, в то время как для получения полной частотной характеристики кроме спектральной плотности входного процесса необходимо знать взаимную спектральную плотность входного и выходного процессов. Следует иметь в виду, однако, что уравнение (1) дает решение, близкое к частотной характеристике реальной системы, лишь в том случае, когда рассматриваемая система линейна.

Спектральные плотности, необходимые для получения решения уравнения идентификации в форме (1), могут быть получены либо путем соответствующей обработки на спектроанализаторе реализацией процессов $x(t)$ и $y(t)$, либо путем применения преобразования Фурье к корреляционным функциям процессов.

В рассматриваемом случае, когда входным процессом являлась скорость взвесенесущего потока, а выходным — мутность, было сделано предположение о том, что исследуемая система близка к линейной, и по уравнению (1) был определен модуль частотной характеристики или так называемая амплитудно-частотная характеристика системы $|H_{xy}(i\omega)|$. Для этого в гидрофизической лаборатории физического факультета МГУ был проведен специальный эксперимент.

Измерения проводились в гидродинамическом лотке длиной 25,5 м, шириной 0,6 м и высотой 0,47 м. В рабочем сечении, которое находилось на расстоянии 12 м от входа в лоток, вблизи осевой вертикали на одной и той же глубине располагались 2 датчика: угловой датчик для измерения пульсаций модуля вектора скорости, основанный на принципе термогидрометра, и фотомутномер для измерения пульсаций мутности. Оба датчика конструкции В. П. Петрова. Описания и схемы датчиков приведены в работах (см. [15, 16]). Датчики располагались на расстоянии 2 см друг от друга, причем приемный элемент датчика скорости был выдвинут на 1 см вперед по отношению к датчику мутности.

Дно лотка перед началом эксперимента было покрыто слоем песка толщиной 4—5 см с диаметром песчинок около 0,2 мм. Во время проведения эксперимента такой же песок подавался в лоток из бункера, расположенного в головной части лотка, что обеспечивало предельное насыщение потока наносами в течение всего эксперимента.

Опыты были проведены при двух скоростных режимах, характеристики которых приведены в табл. 1.

Таблица 1

Режим	Средняя скорость течения, см/с	Глубина, см	Уклон водной поверхности	Число Рейнольдса	Число Фруда	Температура воды, °С
I	53,3	24,0	0,0010	128 000	0,12	15,2
II	83,5	18,0	0,0028	159 000	0,376	15,4

При втором режиме в потоке происходила интенсивная визуально наблюдаемая поперечная циркуляция, в результате чего вдоль оси лотка образовалась продольная песчаная гряда высотой до 2 см.

Всего было проведено 7 опытов: 4 при первом режиме и 3 при втором. В табл. 2 указаны расстояния (l) от поверхности песчаного дна до приемных элементов датчиков в каждом опыте.

Таблица 2

Режим	I			II			7
	1	2	3	4	5	6	
№ опыта							
l , см	1,0	1,5	2,5	3,5	1,0	1,5	2,0

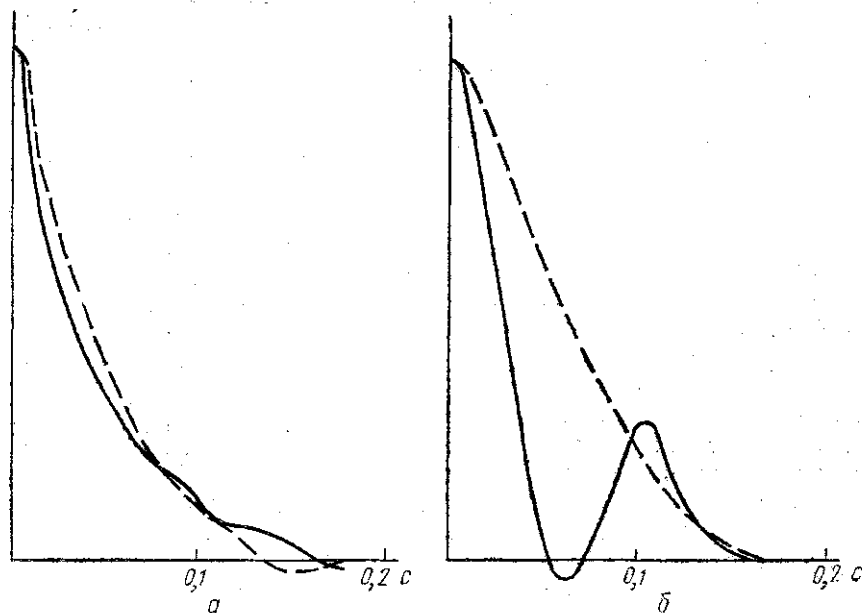


Рис. 2. Образцы графиков нормированных корреляционных функций скорости (а) и мутности (б) по данным измерений в опытах № 3 и 6

Сигналы обоих датчиков записывались по двум каналам на инструментальную магнитную ленту. Обработка сигналов производилась на корреляторе с регистрацией корреляционной функции на самописце. Спектры процессов определялись на «Преобразователе Фурье» и регистрировались на шлейфовом осциллографе. На рис. 2 и 3 даны об-

разцы графиков корреляционных функций и графиков спектральной плотности.

Анализ полученных материалов четко указывает на сосредоточенность энергии потока в низкочастотной части спектра. Время корреляции в большинстве случаев равно 0,15 с. На некоторых корреляционных кривых кроме колебаний основного периода прослеживаются более высокочастотные колебания. На графиках спектральной плотно-

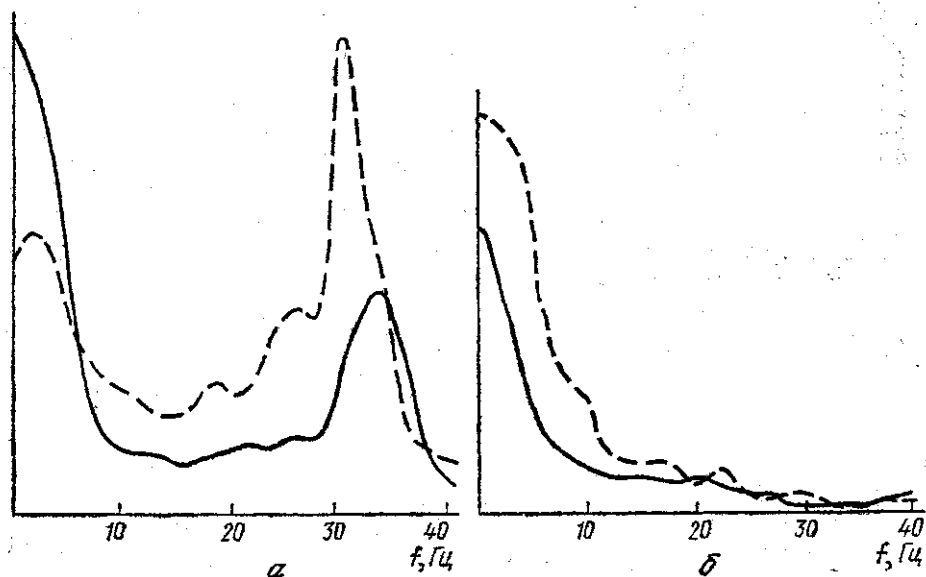


Рис. 3. Образцы графиков спектральной плотности скорости (а) и мутности (б) по данным измерений в опытах № 5 и 7

сти основной максимум расположен вблизи нулевой частоты, но на некоторых кривых, в особенности полученных при втором режиме, имеются вторичные максимумы при частотах порядка 30 Гц. Причем более отчетливо вторичные максимумы выражены на спектральных кривых мутности. Это обстоятельство можно объяснить наличием в потоке отмеченной выше поперечной циркуляции. Вблизи осевой вертикали, где были расположены приемные элементы датчиков, происходила встреча потоков поперечной циркуляции, что приводило к взаимному гашению пульсаций скорости и вызывало выпадение частиц. Это и привело к образованию продольной песчаной гряды. Более яркое отражение этого процесса получено на энергетическом спектре пульсаций мутности. Предположение о справедливости гипотезы «замороженной турбулентности» позволило получить приближенную оценку размеров вихревых образований, соответствующих вторичному максимуму энергии. Оказалось, что указанные вихревые образования имеют размеры порядка 2,0—2,5 см.

Графики амплитудно-частотной характеристики, полученные по уравнению (1), представлены на рис. 4. На всех графиках амплитудно-частотная характеристика растет с увеличением частоты. С точки зрения анализа динамических систем такое поведение амплитудно-частотной характеристики говорит о том, что система пропускает сигналы больших частот лучше, чем сигналы малых частот. В рассматриваемом

случае вид амплитудно-частотной характеристики свидетельствует о том, что с ростом частоты возрастает «чувствительность» пульсаций мутности по отношению к пульсациям скорости, т. е. с увеличением частоты возрастает относительная величина энергии, переходящей от процесса $x(t)$ к процессу $y(t)$. Вероятно, это обстоятельство можно считать экспериментальным подтверждением одного из выводов теории Г. И. Баренблатта о том, что наличие в потоке взвешенных частиц вызывает снижение интенсивности пульсаций скорости — «гашение турбулентности».

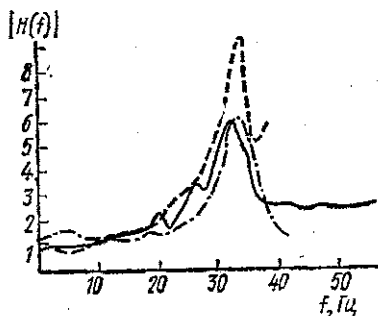


Рис. 4. Графики амплитудно-частотной характеристики по данным измерений в опытах № 5, 6 и 7

На всех графиках амплитудно-частотной характеристики видны отдельные энергетические локализации, свидетельствующие об избирательном характере взаимодействия полей скорости и мутности. Одна из возможных причин появления изолированных пиков в высокочастотной области спектра может быть объяснена особенностью изучаемой системы, заключающейся в высокой чувствительности системы к незначительным изменениям в этой части спектра. Ярко выраженный пик в области 30 Гц явился следствием того, что наличие отмеченной выше поперечной циркуляции нашло более яркое отражение на энергетическом спектре пульсаций мутности.

Таким образом, амплитудно-частотная характеристика системы скорость — мутность представляет дополнительную информацию о влиянии пульсаций скорости потока на пульсации мутности на различных частотах.

При экспериментальных исследованиях взвесенесущего потока зачастую определяются корреляционные функции скорости и мутности в различных точках потока, а также соответствующие им спектральные плотности. Это дает возможность построить поле амплитудно-частотных характеристик.

Проведение экспериментов при различных условиях и построение полей амплитудно-частотных характеристик может помочь в изучении внутренних взаимосвязей рассматриваемых параметров взвесенесущего потока. Конечно, следует помнить, что предлагаемый анализ априори предполагает наличие линейной связи между пульсациями скорости и мутности. Получение же амплитудно-фазовой частотной характеристики, дающей более обширную информацию о взаимосвязи изучаемых процессов, а также установление степени близости связи между процессами, требует знания взаимной корреляционной функции между скоростью и мутностью, а также привлечения специальных методов исследования — методов статистической идентификации динамических систем.

Проведение экспериментов при различных условиях и построение полей амплитудно-частотных характеристик может помочь в изучении внутренних взаимосвязей рассматриваемых параметров взвесенесущего потока. Конечно, следует помнить, что предлагаемый анализ априори предполагает наличие линейной связи между пульсациями скорости и мутности. Получение же амплитудно-фазовой частотной характеристики, дающей более обширную информацию о взаимосвязи изучаемых процессов, а также установление степени близости связи между процессами, требует знания взаимной корреляционной функции между скоростью и мутностью, а также привлечения специальных методов исследования — методов статистической идентификации динамических систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фидман Б. А. Сб. Динамика и термика речных потоков. М., 1972.
2. Франкель Ф. И. ДАН, 1953, 92, № 2.
3. Великанов М. А. «Изв. АН СССР. Отд. техн. наук», 1944, № 3.
4. Баренблатт Г. И. «Прикладная математика и механика», 1953, 17.
5. Баренблатт Г. И. «Прикладная математика и механика», 1955, 19.
6. Симон Н. А., Очеретько В. Ф., Тищенко И. А. Исследования по прикладной гидродинамике. Киев, 1965.

7. Фидман Б. А. Сб. Динамика и термика речных потоков. М., 1972.
8. Гринвальд Д. И. Турбулентность русловых потоков. Л., 1974.
9. Михайлова Н. А. Перенос твердых частиц турбулентными потоками воды. Л., 1966.
10. Россинский К. И. Сб. Динамика и термика речных потоков. М., 1972.
11. Монин А. С., Яглом А. М. Статистическая гидромеханика, ч. I. М., 1965.
12. Гихман И. И., Скороход А. В. Теория случайных процессов, т. I. М., 1971.
13. Пугачев В. С., Казаков И. Е., Евланов Л. Г. Основы статистической теории автоматических систем. М., 1974.
14. Лэннинг Дж. Х., Бэттин Р. Г. Случайные процессы в задачах автоматического управления. М., 1958.
15. Петров В. П., Петрова М. А. Труды III Всесоюзного гидрологического съезда, т. V. Л., 1960.
16. Петров В. П., Савин В. Г. Труды ВОДГЕО, 1970, вып. 26.

Поступила в редакцию
14.9 1976 г.
Кафедра
физики моря и вод суши