

УДК 631.6. (575.2)

Аскалиева Гулзада Орозобаевна, к.т.н., e-mail: 87guzya@mail.ru

Пресняков Константин Александрович, д.т.н., с.н.с.,

Керимкулова Гүлсаат Кубатбековна, к.ф.-м.н., e-mail: gulsaat@mail.ru

Институт машиноведения и автоматизации НАН КР

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТНОГО СПЕКТРА ПУЛЬСАЦИЙ ДИНАМИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ В ОТКРЫТОМ ТУРБУЛЕНТНОМ ПОТОКЕ ВОДЫ

Определен спектр частот пульсаций динамического давления в открытом турбулентном потоке воды. Достоинством предложенного метода является конкретизация интервала низких частот пульсаций динамического давления, что позволяет составить рациональную схему измерений указанных пульсаций в открытом турбулентном потоке воды

Ключевые слова: спектр частот пульсаций динамического давления, удельный расход пульсаций.

Введение. В литературе известен метод определения высокочастотного интервала спектра пульсаций вертикальной компоненты скорости в ламинарном пограничном слое турбулентного потока воды [1], заключающийся в измерении дисперсии вертикальной компоненты скорости воды и вычислении искомой частоты по формуле

$$V_1 = \frac{\sigma_v}{\lambda}, \quad (1)$$

где σ_v – дисперсия вертикальной компоненты скорости воды, м/с, λ – характерный размер высокочастотного вихря Тейлора, м, и отличающийся тем, что измеряют пульсации скорости в ламинарном пограничном слое турбулентного потока воды, оценивают характерный размер вихря Тейлора с учетом ограничения его нахождения в указанной выше зоне, оценивают размеры характерных областей течения в придонной части турбулентного потока воды; вычисляют среднее квадратичное значение пульсаций вертикальной компоненты скорости воды в упомянутой зоне; а также вычисляют на основе проведенных измерений значение диссипации механической энергии в теплоту в пределах ламинарного пограничного слоя воды; оценивают нижний предел искомого интервала частоты на границе турбулентного и ламинарного пограничных слоев и верхний предел указанного интервала частоты на верхней границе нижнего мономолекулярного слоя воды, находящегося в непосредственном контакте с дном водотока; составляют высокочастотный интервал спектра пульсаций вертикальной компоненты скорости воды в ламинарном пограничном слое; сравнивают теоретические и экспериментальные значения упомянутого интервала частот и делают вывод о степени сравнимости полученных значений частоты.

Основным недостатком этого метода является привязка его к размерам вихря Тейлора, который ни рассчитать теоретически, ни определить экспериментально невозможно. Кроме того, рассматриваемый метод распространяется на область ламинарного и турбулентного пограничных слоев потока воды.

Задачи исследований – определить спектр частот пульсаций динамического давления в открытом турбулентном потоке воды.

Решение поставленной задачи. Метод определения частотного спектра пульсаций динамического давления в открытом турбулентном потоке воды [2] заключается в выборе области измерений, измерении в указанной области пульсаций вертикальной компоненты скорости воды, – в котором в качестве области измерений полагают в целом турбулентный поток воды, измеряют в указанной области распределение пульсаций динамического давления по глубине потока воды $P'_d(\tilde{y})$ (где

\tilde{y} – относительная вертикальная координата), определяют удельный расход упомянутых пульсаций $M_{P'_d}$, а частоту пульсаций динамического давления находят из отношения первого ко второму.

Запишем в общем виде выражение для пульсаций динамического давления

$$P'_d = 2 \cdot \rho \cdot (u(\tilde{y}) \cdot u'(\tilde{y}) + (v'(\tilde{y}))^2) \quad (2)$$

где P'_d – пульсаций динамического давления, Па; ρ – плотность воды, кг/м³; $u(\tilde{y})$ – распределение продольной компоненты скорости воды, м/с; $u'(\tilde{y})$ – распределение пульсаций продольной компоненты скорости воды, м/с; $v'(\tilde{y})^2$ – квадрат пульсаций вертикальной компоненты скорости воды, м²/с² [3].

Для проведения конкретного анализа необходимо привлечь конкретное распределение продольной компоненты скорости воды по глубине потока и выражения для пульсаций продольной и вертикальной компонент скорости воды:

$$P'_d = 2 \cdot \rho \cdot (u(\tilde{y}) \cdot 2,10 \cdot u_* \cdot \phi(\tilde{y}) + 1,05^2 \cdot u_*^2 \cdot \psi^2(\tilde{y})), \quad (3)$$

$$P'_d = 2 \cdot \rho \cdot \left(u_m \cdot \left(1 - \frac{m_1}{C} \cdot \frac{\bar{u}}{u_m} \cdot (1 - \tilde{y})^2 \right) \cdot 2,10 \cdot u_* \cdot \phi(\tilde{y}) + 1,05^2 \cdot u_*^2 \cdot \psi^2(\tilde{y}) \right). \quad (4)$$

где C – коэффициент Шези, м^{1/2}/с; $m_1 = 0,35 \cdot C + 3$ – размерный (м^{1/2}/с) параметр, зависящий от коэффициента Шези; \bar{u} – средняя скорость воды, м/с; u_* – динамическая скорость потока воды, м/с; u_m – максимальная скорость потока воды, м/с;

$\phi(\tilde{y}) = 0,25 + \left(\frac{0,21}{0,28 + \tilde{y}} \right)$ – координатная часть распределения пульсаций продольной компоненты скорости воды по глубине потока; $\psi(\tilde{y}) = \frac{0,677 \cdot \tilde{y}}{\tilde{y} + 0,036} \cdot (\tilde{y}^2 - 2 \cdot \tilde{y} + 2)$ – координатная часть распределения пульсаций вертикальной компонент скорости по глубине потока.

Для дальнейшего анализа необходимо привлечь следующую гипотезу.

Распределение пульсаций динамического давления по глубине открытого бурного турбулентного потока воды содержит в неявной форме информацию о частотах указанных пульсаций.

Запишем выражение для удельного (на единицу ширины потока) расхода пульсаций продольной компоненты скорости воды

$$q_{u'} = \bar{u}' \cdot H, \quad (5)$$

где

$$\bar{u}' = 2,10 \cdot u_* \cdot \int_{\tilde{\Delta}}^1 \phi(\tilde{y}) d(\tilde{y}) = 2,10 \cdot u_* \cdot \int_{\tilde{\Delta}}^1 \left(0,25 + \frac{0,21}{0,28 + \tilde{y}} \right) d(\tilde{y}), \quad (6)$$

$q_{u'}$ – м²/с.

Массовый удельный расход пульсаций продольной компоненты скорости в открытом бурном турбулентном потоке воды (или же удельный расход пульсаций динамического давления) будет иметь вид

$$M_{P'_d} = \rho \cdot \bar{u}' \cdot H, \quad (7)$$

$M_{P'_d}$ измеряется в кг/м³·с.

Разделим выражение для пульсаций динамического давления на удельный расход пульсаций динамического давления, получим в общем виде формулу для вычисления искомой частоты

$$\Omega = \frac{P'_d}{M_{P'_d}} = \frac{2 \cdot (u(\tilde{y}) \cdot u'(\tilde{y}) + (v'(\tilde{y}))^2)}{u' \cdot H}, \quad (8)$$

где Ω – круговая частота пульсаций динамического давления, Гц.

Для примера использования параболического профиля скорости воды указанная частота вычисляется по формуле

$$\Omega = \frac{2 \cdot \left(u_m \cdot \left(1 - \frac{m_1}{C} \cdot \frac{\bar{u}}{u_m} \cdot (1 - \tilde{y})^2 \right) \cdot 2,10 \cdot u_* \cdot \phi(\tilde{y}) + 1,05^2 \cdot u_*^2 \cdot \psi^2(\tilde{y}) \right)}{2,10 \cdot u_* \cdot \int_{\Delta} \phi(\tilde{y}) d(\tilde{y}) \cdot H}. \quad (9)$$

На рисунке 1 приведены графики $P'_d = P'_d(\Omega)$ для опытов на каналах Туш и Меркенский [4], заметно, что пульсации динамического давления зависят от их частоты по линейному закону, где коэффициентом пропорциональности является удельный расход указанных пульсаций.

Интервал выявленных частот пульсаций динамического давления составляет совокупность значений от 17 до 55 Гц, причем максимальные значения указанной характеристики находятся в диапазоне от 24 до 55 Гц.

В безразмерном виде спектр пульсаций динамического давления представлен в таблице 1 и изображен на рисунке 2, откуда видно, что все точки, относящийся к рассмотренным объектам легли на одну прямую.

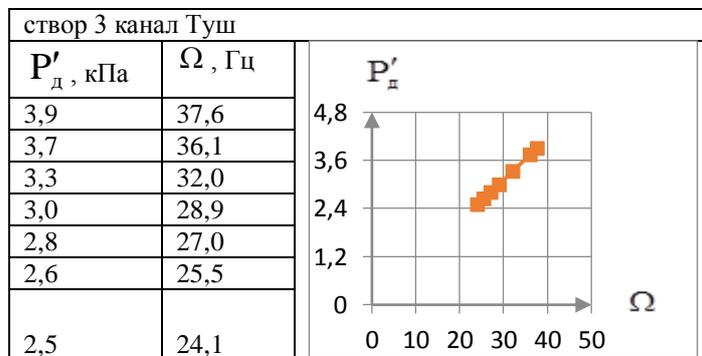


Рисунок 1 – Зависимость значений пульсаций динамического давления от их частоты в открытых бурных турбулентных потоках воды

Из гидродинамики известно [5], что крупномасштабные вихри располагаются в верхней части турбулентного потока воды, а мелкомасштабные – в придонной части его.

Таблица 1 – Низкочастотная часть спектра пульсаций динамического давления в открытых бурных турбулентных потоках воды

канал Туш, створ 3		канал Туш, створ 13		канал Туш, створ 15		канал Туш, створ 25		канал Туш, створ 38		канал Меркенский, створ б		канал Меркенский, створ в	
\tilde{P}'_d	$\tilde{\Omega}$	\tilde{P}'_d	$\tilde{\Omega}$	\tilde{P}'_d	$\tilde{\Omega}$	\tilde{P}'_d	$\tilde{\Omega}$	\tilde{P}'_d	$\tilde{\Omega}$	\tilde{P}'_d	$\tilde{\Omega}$	\tilde{P}'_d	$\tilde{\Omega}$
1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

0,96	0,96	0,96	0,96	0,98	0,98	0,97	0,97	0,97	0,97	0,91	0,91	0,9	0,9
0,85	0,85	0,86	0,86	0,87	0,87	0,86	0,86	0,87	0,87	0,85	0,85	0,84	0,84
0,77	0,77	0,78	0,78	0,79	0,79	0,78	0,78	0,79	0,79	0,8	0,8	0,79	0,79
0,72	0,72	0,74	0,74	0,74	0,74	0,72	0,72	0,74	0,74	0,76	0,76	0,75	0,75
0,68	0,68	0,7	0,7	0,7	0,7	0,68	0,68	0,7	0,7	0,72	0,72	0,71	0,71
0,64	0,64	0,66	0,66	0,66	0,66	0,64	0,64	0,66	0,66				

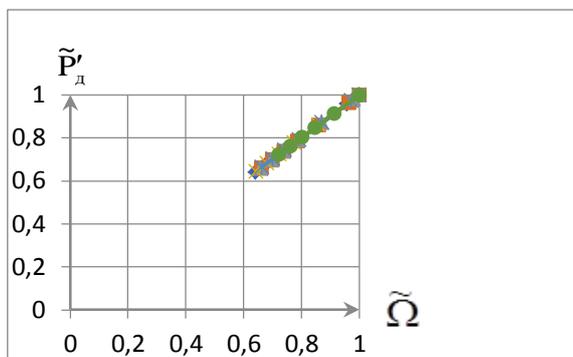


Рисунок 2 – Низкочастотная часть спектра пульсаций динамического давления в открытых бурных турбулентных потоках воды

Соответственно этому, распределение продольной компоненты скорости по глубине турбулентного потока воды согласуется с указанным распределением вихрей, т.е. максимум продольной скорости наблюдается в приповерхностном слое, а ее минимальные значения в придонной его части [6].

Значения пульсаций продольной компоненты скорости воды изменяются с вертикальной координатой по кривой с максимумом в придонной части потока [7].

Подобное увеличение пульсационных характеристик по глубине турбулентного потока воды наблюдается и для пульсаций динамического давления [3], максимум которого выявлен на выступе шероховатости.

В упомянутой работе М.А. Великанова имеется графическое изображение частотного спектра пульсаций продольной компоненты скорости турбулентного потока воды [5, рис. 49, стр. 258], которое в схематичном виде представлено на рисунке 3.

$F(\Omega), \text{Гц}$

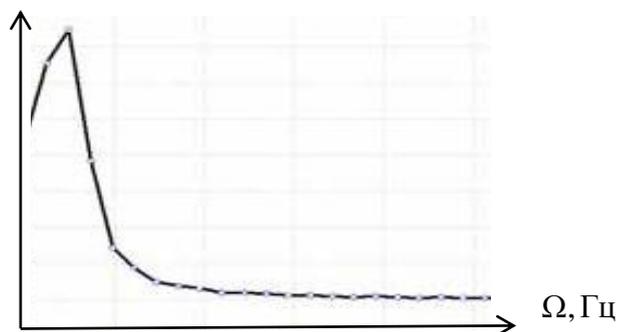


Рисунок 3 – Схематичное изображение частотного спектра пульсаций продольной компоненты скорости турбулентного потока воды (наподобие рисунка 49 из монографии М.А. Великанова [5, рис. 49, стр. 258]).

Указанный спектр состоит из восходящей и нисходящей ветвей, причем левая часть рассматриваемого спектра представляет собой прямую линию.

Сопоставление наших результатов (рис. 1) с упомянутым спектром М.А. Великанова позволяет заключить, что нами установлена низкочастотная часть спектра пульсаций динамического давления в открытом бурном турбулентном потоке воды.

Следует отметить, что полученные результаты справедливы для случаев использования параболического профиля скорости воды, а также для применения пульсационных соотношений И.К. Никитина. Действительно, анализируя формулу частоты пульсаций динамического давления, можно заметить, что основные характеристики рассматриваемых объектов (динамическая скорость u_* и относительная шероховатость $\tilde{\Delta}$) входят в указанную формулу не равноправным образом, а именно: динамическая скорость, как можно показать, входит множителем как числитель, а также и в знаменатель, рассматриваемого выражения, а относительная шероховатость может иметь косвенное значение через нижний предел интеграл

$$\int_{\tilde{\Delta}}^1 \phi(\tilde{y})d(\tilde{y}).$$

Правда, в круглой скобке числителя после осуществленной операции с u_* , во втором члене остается динамическая скорость в первой степени. Но ее влияние на рассматриваемую величину, по сравнению с первым членом, где фигурирует продольная компонента скорости, достаточно слабо.

Оценка значений интеграла приводит к следующему результату (таблица 2). Значение указанного интеграла практически не зависит от относительной шероховатости (среднее значение его равно $0,56 \pm 0,01$)

Таблица 2 – Оценка значений интеграла

створ	$\tilde{\Delta}$	$\int_{\tilde{\Delta}}^1 \phi(\tilde{y})d(\tilde{y})$
канал Туш		
3, 25	0,020	0,560
13, 38	0,018	0,562
15	0,024	0,556
канал Меркенский		
б	0,009	0,572
в	0,010	0,571
среднее		$0,56 \pm 0,01$

Таким образом, показана независимость частоты пульсаций динамического давления от динамической скорости потока и относительной шероховатости его дна. Повторимся, что этот результат имеет место для применения параболического профиля скорости воды и пульсационных соотношений И. К. Никитина.

Метод определения частотного спектра пульсаций динамического давления в открытом турбулентном потоке воды осуществляют следующим образом (рис. 4):

- ✓ выбирают области измерений (блок 1);
- ✓ измеряют в указанной области распределение пульсаций динамического давления по глубине открытого турбулентного потока воды (блок 2, 3);
- ✓ вычисляют удельной расход пульсаций динамического давления для рассматриваемых объектов (блок 4);
- ✓ определяют частоты пульсаций динамического давления путем деления первого на второе (блок 5);

- ✓ формируют частотный спектр пульсаций динамического давления (блок 6);
- ✓ сравнивают полученный спектр с частотным спектром пульсаций скорости турбулентного потока воды (блок 7);
- ✓ анализируют полученные результаты, что позволяет классифицировать установленный частотный спектр как низкочастотную часть спектра пульсаций динамического давления (блок 8).



Рисунок 4 – Структурная блок-схема метода определения частотного спектра пульсаций динамического давления в открытом турбулентном потоке воды.

Заключение. Достоинством предложенного метода является конкретизация интервала низких частот пульсаций динамического давления, что позволяет составить рациональную схему измерений указанных пульсаций в открытом турбулентном потоке воды.

Литература

1. Пресняков К.А., Керимкулова Г.К., Аскалиева Г.О., Першакова Е.Ю. Способ определения высокочастотного интервала спектра пульсаций вертикальной компоненты скорости в ламинарном пограничном слое турбулентного потока воды / Патент КР №2197.–Бишкек: Кыргызпатент.–Бюллетень патентов и товарных знаков КР.–№3.– 31.03.2020. –10с.
2. Пресняков К.А., Керимкулова Г.К., Аскалиева Г.О. Способ определения частотного спектра пульсаций динамического давления в открытом турбулентном потоке воды / Заявка №3756 от 29.04.2022 г.–Бишкек: Кыргызпатент.
3. Керимкулова, Г. К. Исследование пульсаций динамического давления в открытом бурном турбулентном потоке воды (на основе параболического профиля скорости воды) / Г. К. Керимкулова, К. А. Пресняков, Г. О. Аскалиева // Проблемы автоматизации и управления. – 2022. – № 1(43). – С. 61-71. – EDN IELPFZ.
4. Талмаза В.Ф., Романенко Г.Н. Распределение осредненных скоростей в бурных потоках // Вопросы водного хозяйства (гидротехника). – Фрунзе: Кыргызстан, 1972. – Вып. 26. – С. 99–109.
5. М.А.Великанов. Динамика русловых потоков, Т.1 Структура потока. М.: Госиздат техн.-теор. лит., 1954, 323 с.
6. Чугаев Р.Р. Гидравлика. – Л.: Энергия (Лен.отделение), 1976.
7. Никитин И.К. Турбулентный русловой поток и процессы в придонной области.– Киев: Изд-во АН УССР, 1963.