

УДК 631.6. (575.2)

*Пресняков К. А., д.т.н., с.н.с.*

*Керимкулова Г.К., к.ф.-м.н., [gulsaat@mail.ru](mailto:gulsaat@mail.ru)*

*Аскалиева Г. О., к.т.н., [87guzuza@mail.ru](mailto:87guzuza@mail.ru)*

*Институт машиноведения и автоматизации НАН КР, Бишкек, Кыргызстан*

## ПУЛЬСАЦИИ ДИНАМИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ В ОТКРЫТОМ ТУРБУЛЕНТНОМ ПОТОКЕ ВОДЫ

Установлена формула для распределения пульсаций гидродинамического давления по глубине потока воды: значения указанных пульсаций уменьшаются с уменьшением относительной вертикальной координаты. Показано, что пульсации гидродинамического давления оказывают достаточно слабое возможное влияние их на площадку размером  $1\text{ м}^2$  в придонной части потока.

**Ключевые слова:** открытый турбулентный поток воды, усредненная скорость воды и ее пульсации, динамическое давление и его пульсации.

**Введение.** Как известно, турбулентному потоку воды присуще упорядоченное его движение, описываемое полем осредненных компонент его скорости [1]. Наличие в рассматриваемом объекте инерционных сил [2] способствует возникновению динамического давления. Оба указанных поля взаимосвязаны друг с другом.

**Постановка задачи исследования.** Поле осредненных скоростей турбулентного потока воды сопровождается возникновением поля его пульсаций [3]. Логично, что динамическое давление в потоке воды также не отрицает существование в нем поля его пульсаций. Указанные поля пульсаций скорости и динамического давления должны быть связаны друг с другом.

**Задачи исследований.** Найти выражения для поля пульсаций динамического давления (распределение пульсаций динамического давления по глубине потока) с целью выявления возможного влияния указанных пульсаций на границы открытого турбулентного потока воды и на отдельные элементы гидротехнических сооружений.

**Решение поставленных задач.** В случае прямолинейного (отсутствие поперечных течений) плоскопараллельного потока воды запишем выражение для динамического давления:

$$P_d = \rho(u^2 + v^2), \quad (1)$$

где  $P_d$  – динамическое давление, Па;  $u$ ,  $v$  – продольная и вертикальная компоненты скорости воды соответственно, м/с;  $\rho$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>.

Введем в формулу (1) пульсации соответствующих величин

$$P_{d,i} \pm P'_d = \rho[(u_i \pm u')^2 + (v_i \pm v')^2], \quad (2)$$

где  $P_{d,i}$ ,  $u_i$ ,  $v_i$  – текущие значения соответствующих величин;  $P'_d$ ,  $u'$ ,  $v'$  – пульсации соответствующих величин.

Раскроем круглые скобки правой части уравнения (2)

$$P_{д,i} \pm P'_д = \rho \left[ u_i^2 \pm 2 \cdot u_i \cdot u' + u'^2 + v_i^2 \pm 2 \cdot v_i \cdot v' + v'^2 \right]. \quad (3)$$

Учтем, что  $P_{д,i}$  равняется  $\rho \cdot (u_i^2 + v_i^2)$ . Тогда  $\pm P'_д$  будет равно

$$\rho \left[ \pm 2 \cdot u_i \cdot u' + u'^2 \pm 2 \cdot v_i \cdot v' + v'^2 \right]. \quad (4)$$

Разделим обе части уравнения (4) на  $(\pm 1)$ . Будем иметь

$$P'_д = \rho \cdot \left( 2 \cdot u_i \cdot u' \pm u'^2 + 2 \cdot v_i \cdot v' \pm v'^2 \right). \quad (5)$$

В связи с тем, что вертикальной компоненте скорости и ее пульсации присущ один и тот же порядок, имеет место приближенное равенство

$$v(\tilde{y}) \approx v'(\tilde{y}).$$

Следовательно, получим

$$P'_д = \rho \cdot \left( 2 \cdot u_i \cdot u' \pm u'^2 + 2 \cdot v'^2 \pm v'^2 \right). \quad (6)$$

Рассмотрим два последних члена правой части уравнения (6). В случае знака «минус» второй член  $2 \cdot v'^2 \pm v'^2 = v'^2$ . А в случае знака «плюс» во втором члене  $2 \cdot v'^2 \pm v'^2 = 3v'^2$ .

Среднее значение рассматриваемой величины будет равно  $2 \cdot v'^2 \pm v'^2 = 2v'^2$ .

Тогда получим

$$P'_д = \rho \cdot \left( 2 \cdot u_i \cdot u' \pm u'^2 + 2 \cdot v'^2 \right). \quad (7)$$

Рассмотрим первые два члена правой части уравнения. В случае знака «минус» во втором члене  $2 \cdot u_i \cdot u' \pm u'^2 = 2 \cdot u_i \cdot u' - u'^2$ . И в случае знака «плюс» во втором члене  $2 \cdot u_i \cdot u' \pm u'^2 = 2 \cdot u_i \cdot u' + u'^2$ . Сумма этих выражений будет равна  $2 \cdot u_i \cdot u' - u'^2 + 2 \cdot u_i \cdot u' + u'^2 = 4 \cdot u_i \cdot u'$ .

Среднее значение составляет  $2 \cdot u_i \cdot u'$ .

Перепишем уравнение (7), получим

$$P'_д = 2 \cdot \rho \cdot \left( u_i \cdot u' + v'^2 \right). \quad (8)$$

Для проведения дальнейших преобразований формулы (8) используем следующие соотношения:

$$u' = 2,10 \cdot u_* \cdot \phi(\tilde{y}), \quad v' = 1,05 \cdot u_* \cdot \psi(\tilde{y}), \quad [4, \text{с.108, ф.44 и ф.46}] \quad (9)$$

где  $u_*$  – динамическая скорость потока воды, м/с;  $\phi(\tilde{y})$ ,  $\psi(\tilde{y})$  – координатные части выражений для распределения пульсаций продольной компоненты скорости воды.

Кроме того, для конкретности нашего анализа используем в качестве профиля продольной компоненты скорости воды показательный закон  $u_i = u_m \cdot \tilde{y}^{1/m}$ .

После простейших преобразований (опущены) получим

$$P'_д = 2 \cdot \rho \cdot u_*^2 \cdot \left( 2,10 \cdot \frac{u_m}{u_*} \cdot \tilde{y}^{1/m} \cdot \phi(\tilde{y}) + 1,05^2 \cdot \psi^2(\tilde{y}) \right). \quad (10)$$

Теперь обезразмерим обе части равенства (10).

Для этого разделим их на величину нормального давления

$P_0=101\ 345\ \text{Па} = 1,01 \cdot 10^5\ \text{Па}$  (учтено, что стандарта пульсаций динамического давления не существует).

$$\tilde{P}'_d = \frac{2 \cdot \rho \cdot u_*^2}{1,01 \cdot 10^5} \cdot \left[ 2,10 \cdot \frac{u_m}{u_*} \cdot \tilde{y}^{1/m} \cdot \phi(\tilde{y}) + 1,05^2 \cdot \psi^2(\tilde{y}) \right]. \quad (11)$$

Выражение (11) перепишем в другом виде

$$\tilde{P}'_d = A \cdot \left( B \cdot \tilde{y}^{1/m} \cdot \phi(\tilde{y}) + 1,05^2 \cdot \psi^2(\tilde{y}) \right), \quad (12)$$

где  $A = \frac{2 \cdot 10^3}{1,01 \cdot 10^5} \cdot u_*^2$ ;  $B = 2,10 \cdot \frac{u_m}{u_*}$ .

Для проверки легитимности уравнения (12) определим размерность коэффициента А

$$[A] = \frac{[\rho] \cdot [u_*^2]}{[P_0]} = \frac{\text{М} \cdot \text{Л}^{-3} \cdot \text{Л}^2 \cdot \text{Т}^{-2}}{\text{М} \cdot \text{Л} \cdot \text{Т}^{-2} \cdot \text{Л}^{-2}} = \frac{\text{М} \cdot \text{Л}^{-1} \cdot \text{Т}^{-2}}{\text{М} \cdot \text{Л}^{-1} \cdot \text{Т}^{-2}} = 1; \quad (13)$$

т.е. показана безразмерность коэффициента А и тем самым безразмерность в целом уравнения (12).

Для пользования уравнением (12) необходимо составить таблицу исходных характеристик, относящихся к рассматриваемым объектам (таблица) [4].

Наш анализ проведем с использованием эмпирических данных по ПК р. Тору-Айгыр, каналу Туш и каналу Меркенскому (таблица) [5].

Результаты расчетов пульсаций динамического давления осуществлены с использованием формулы (12) и приведены на рисунке.

Таблица. Значения коэффициентов А, В для рассматриваемых опытов

Объект	$u_m$ , м/с	$u_*$ , м/с	$\tilde{\Delta}$	m	1/m	A	B
{8;10} ПК р. Тору-Айгыр	1,57	0,275	0,0571	4	0,25	0,0015	11,99
3 канал Туш	6,43	0,219	0,020	7	0,14	0,00095	61,66
13 канал Туш	8,20	0,237	0,018	9	0,11	0,0011	72,66
15 канал Туш	3,86	0,188	0,024	6	0,17	0,0007	43,12
25 канал Туш	3,72	0,188	0,020	6	0,17	0,0007	41,55
38 канал Туш	3,82	0,188	0,018	6	0,17	0,0007	42,67
б канал Меркенский	5,80	0,410	0,009	6	0,17	0,0033	29,71
В канал Меркенский	3,94	0,260	0,010	6	0,17	0,0013	31,82

**Обсуждение результатов исследований.** Все установленные кривые являются однотипными: они показывают уменьшение пульсаций динамического давления с уменьшением вертикальной координаты, причем разброс эмпирических точек выявляется в придонной части потока воды (при  $\tilde{y} \leq 0,2$ ).

Минимальные значения  $\tilde{P}'_d$  выявлены в придонной части потока при  $\tilde{y} \leq 0,02$ , при этом сами значения  $\tilde{P}'_d$  (\*) соответствуют третьему знаку после запятой. Максимальные

значения пульсаций динамического давления установлены вблизи поверхности потока воды, а значения  $\tilde{P}'_d (**)$  находятся во втором знаке после запятой.

Сила, обусловленная минимальными пульсациями гидродинамического давления, равна

$$F_{P_d} = P'_d \cdot S = \tilde{P}'_d \cdot P_0 \cdot S \approx 10^{-2} \cdot 1,01 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot S \approx 1 \cdot 10^3 \text{ Па} \cdot S. \quad (14)$$

Для площадки размером в  $1 \text{ м}^2$  искомая сила будет равна

$F_{P_d} \approx 10^2 \text{ Н}$ , или 10 кГ силы (внесистемная единица измерения) на  $1 \text{ м}^2$ ,  
или 1Гр силы (внесистемная единица измерения) на  $\text{см}^2$ .

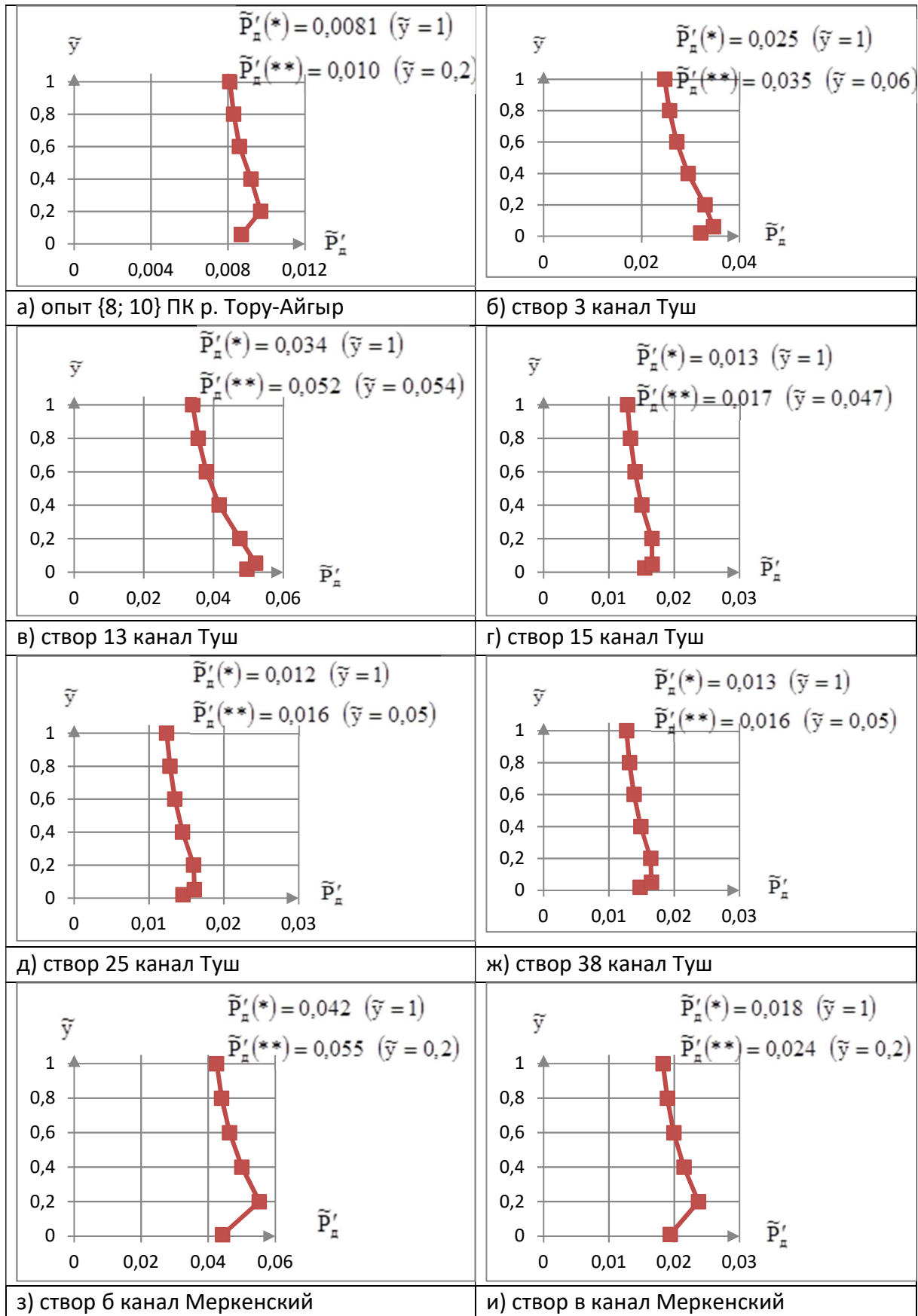


Рис. Распределение относительных пульсаций динамического давления воды. Условные обозначения: 1) в скобках указаны значения относительной координаты,

соответствующие значениям пульсаций динамического давления; 2) \* и \*\* – минимальные и максимальные значения  $\tilde{P}'_d$ .

Эта предварительная оценка показывает достаточно слабое возможное влияние пульсаций динамического давления на площадку размером  $1\text{ м}^2$ , расположенную в придонной части потока воды.

**Заключение.** Получена формула для распределения пульсаций гидродинамического давления по глубине потока с максимальными ее значениями близи поверхности и минимальными – в придонной части потока воды. Предварительная оценка возможного влияния пульсаций гидродинамического давления на площадку размером  $1\text{ м}^2$  в придонной части потока воды показала достаточно малую степень его.

### *Литература*

1. Чугаев Р.Р. Гидравлика. – Л.: Энергия (Лен.отделение), 1976.
2. Великанов М.А. Динамика русловых потоков. – Т.1 Структура потока. – М.: Госиздат техн.-теор. лит., 1954. –323 с.
3. Никитин И.К. Турбулентный русловой поток и процессы в придонной области. – Киев: Изд-во АН УССР, 1963. –138с.
4. Аскалиева Г.О., Пресняков К.А, Керимкулова Г.К. Модель и алгоритмы идентификации параметров открытых водотоков. – LAP LAMBERT, 2019 г. – 177с.
5. Пресняков К.А., Керимкулова Г.К. Установление средне-интегрального профиля скорости воды частично изученного открытого водотока на основе реконструкции эмпирических данных // Проблемы автоматики и управления. –2012.– №2(23) – С. 47–56.