

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 631.6. (575.2)

К.А. Пресняков, д.т.н., с.н.с.,

Г.К. Керимкулова к.ф.-м.н., с.н.с., gulsaat@mail.ru

Г.А. Аскалиева, к.т.н., 87guzya@mail.ru

Институт машиноведения и автоматизации НАН КР

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПУЛЬСАЦИЙ ДИНАМИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ И КОМПОНЕНТ СКОРОСТИ В ОТКРЫТОМ ТУРБУЛЕНТНОМ ПОТОКЕ ВОДЫ

Установлено распределение динамического давления по глубине потока воды: уменьшение динамического давления с уменьшением вертикальной координаты с максимальным относительным значением динамического давления в приповерхностном слое воды. Выявлено распределение пульсаций динамического давления по глубине потока воды: увеличение пульсаций динамического давления с уменьшением вертикальной координаты. Предварительная оценка величины сил, обусловленных динамическим давлением, составляет 270 Г силы на 1 см², а его пульсаций – 1 Г силы на 1 см².

Ключевые слова: динамическое давление, пульсации динамического давления

Введение. В открытом турбулентном потоке воды существует поле осредненных скоростей и связанных с ним поле пульсаций компонент скорости [1]. В связи с наличием в потоке воды инерционных сил в нем развивается поле гидродинамического давления и обусловленное им поле его пульсаций [2].

Постановка задачи исследования. В работе [3] выявлено распределение относительных пульсаций гидродинамического давления по глубине потока. Однако полученная там формула не является строгой, так как при отсутствии стандарта пульсаций гидродинамического давления упомянутое распределение установлено с применением в качестве делителя нормального давления, т.е. величины, характеризующей статическое давление. Возникает необходимость в поиске такой формы указанного распределения, которое не основано на использовании величины нормального давления.

Задачи исследований. Разработать схему расчета поля пульсаций гидродинамического давления, основанного на применении характерной величины, близкой по смыслу к динамическому давлению, и провести сравнительный анализ пульсаций гидродинамического давления и компонент скорости в открытом турбулентном потоке воды.

Решение поставленных задач. Вначале найдем распределение динамического давления по глубине потока воды, рассматривая прямолинейный поток воды (поперечные скорости достаточно малые) и учитывая, что при отсутствии универсального распределения вертикальной компоненты скорости воды по глубине потока ее полагаем одного порядка с распределением ее пульсаций, получим следующее выражение для динамического давления:

$$P_d = \rho \cdot (u^2 + v^2) = \rho \cdot u_*^2 \cdot \left(\left(\frac{u_m}{u_*} \right)^2 \cdot \tilde{y}^{2/m} + 1,05^2 \cdot \psi^2(\tilde{y}) \right). \quad (1)$$

Перейдем к относительным значениям динамического давления, разделив его на величину нормального давления (здесь мы идем по следу предыдущего вывода [3] формулы для пульсаций динамического давления):

$$\begin{aligned} \tilde{P}_d = \frac{P_d}{P_0} &= \frac{\rho \cdot u_*^2 \cdot \left(\left(\frac{u_M}{u_*} \right)^2 \cdot \tilde{y}^{2/m} + 1,05^2 \cdot \psi^2(\tilde{y}) \right)}{P_0} = \\ &= \frac{\rho \cdot u_*^2}{P_0} \cdot \left(\frac{u_M}{u_*} \right)^2 \cdot \tilde{y}^{2/m} + 1,05^2 \cdot \psi^2(\tilde{y}). \end{aligned} \quad (2)$$

Распределение динамического давления по глубине потока изображено на рисунке 1. Анализ представленного графического материала позволяет заключить:

- динамическое давление для исследованных объектов монотонно уменьшается с уменьшением вертикальной координаты;
- максимальные относительные значения динамического давления соответствуют приповерхностному слою воды и составляют величины порядка первого и второго знака после запятой;
- минимальные относительные значения динамического давления наблюдаются в придонной части потока воды (на выступе шероховатости) и составляют величины от третьего знака до первого знака после запятой.

Теперь, следуя предыдущей логике анализа, найдем относительные значения пульсаций динамического давления (вторая схема расчета), которая основана на применении в качестве делителя не значения нормального давления (статической составляющей полного давления), а распределение динамического давления по глубине потока воды (рисунок 2)

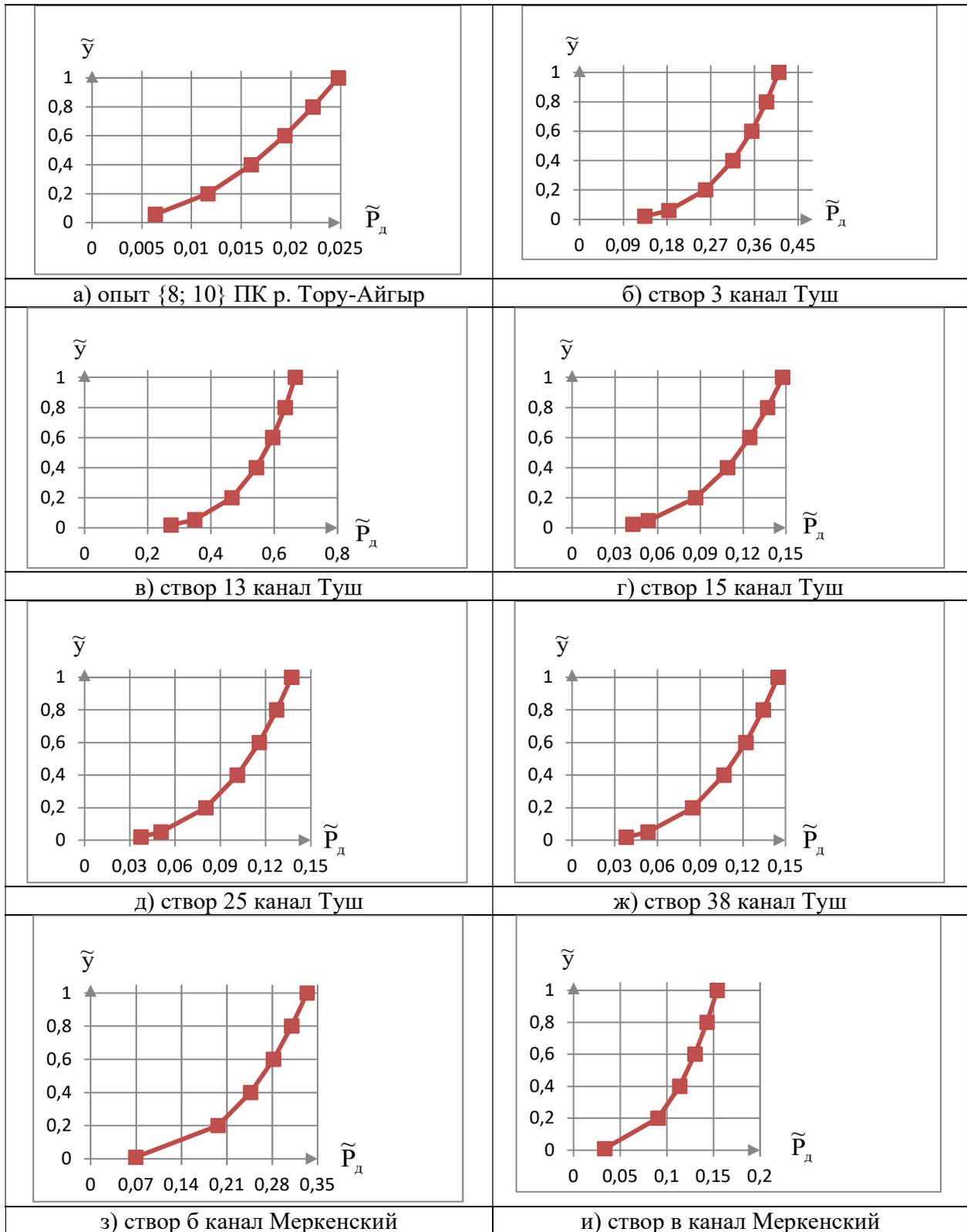


Рисунок 1– Распределение относительных значений динамического давления по глубине открытого турбулентного потока воды

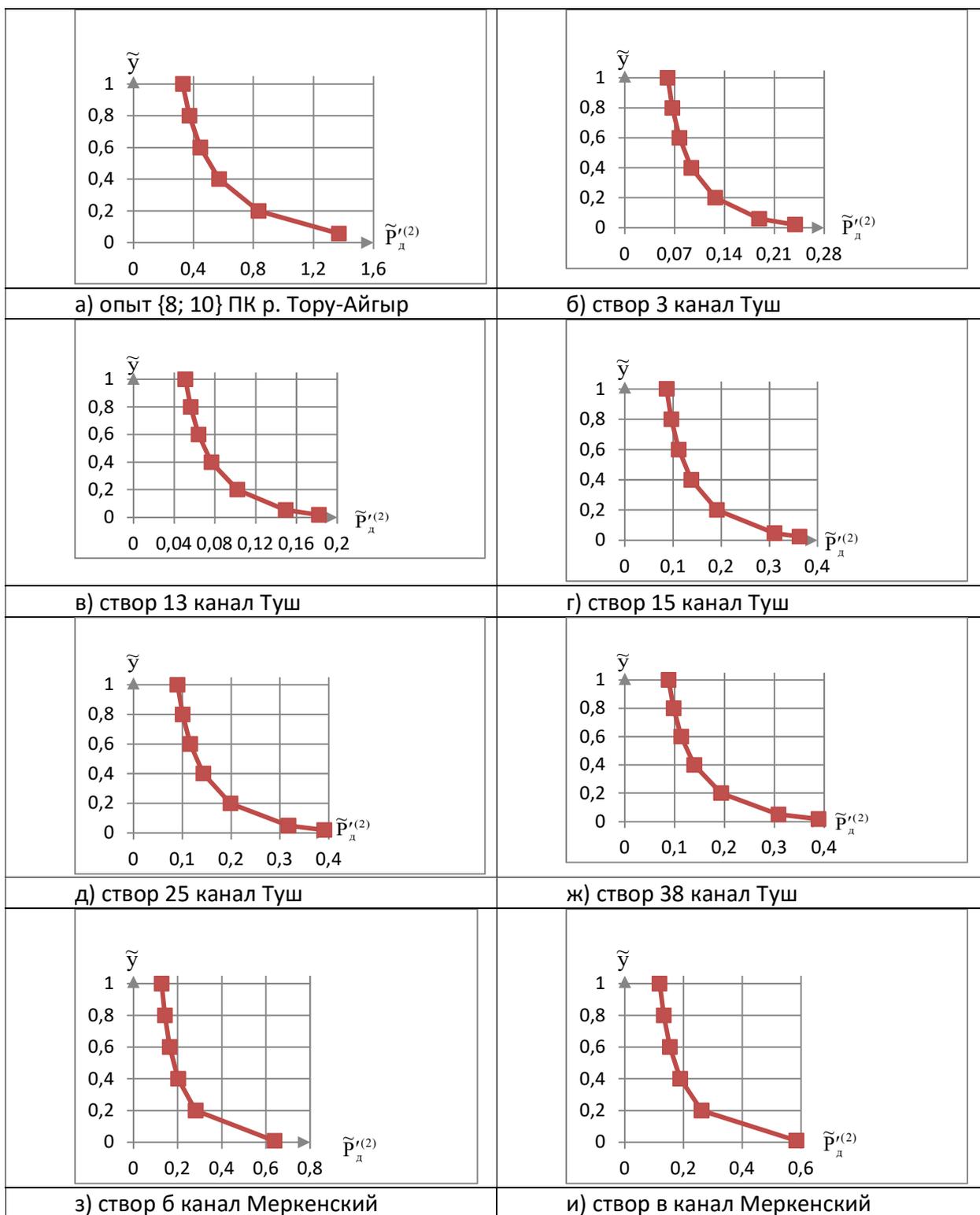


Рисунок 2 – Распределение относительных значений пульсаций динамического давления по глубине открытого турбулентного потока воды (вторая схема расчета).

$$\begin{aligned} \tilde{P}'_{д(2)} &= \tilde{P}'_{д} / P_{д} = \frac{P'_{д} / P_0}{P_{д} / P_0} = \frac{P'_{д}}{P_{д}} = \\ &= \frac{2 \cdot \rho \cdot u_*^2 \cdot \left(2,10 \cdot \frac{u_m}{u_*} \cdot \tilde{y}^{1/m} \cdot \phi(\tilde{y}) + 1,05^2 \cdot \psi^2(\tilde{y}) \right)}{\rho \cdot u_*^2 \cdot \left(\left(\frac{u_m}{u_*} \right)^2 \cdot \tilde{y}^{2/m} + 1,05^2 \cdot \psi^2(\tilde{y}) \right)} = \frac{2 \cdot \left(2,10 \cdot \frac{u_m}{u_*} \cdot \tilde{y}^{1/m} \cdot \phi(\tilde{y}) + 1,05^2 \cdot \psi^2(\tilde{y}) \right)}{\left(\frac{u_m}{u_*} \right)^2 \cdot \tilde{y}^{2/m} + 1,05^2 \cdot \psi^2(\tilde{y})}, \quad (3) \end{aligned}$$

где ρ – плотность воды, кг/м³; u_* – динамическая скорость потока воды, м/с; u_m – максимальная скорость потока воды, м/с; $P_0=101\,345$ Па = $1,01 \cdot 10^5$ Па – нормальное давление, \tilde{y} – относительная вертикальная координата; m – показатель, зависящий от коэффициента Шези; $\phi(\tilde{y})$ и $\psi(\tilde{y})$ – координатные части пульсаций продольной и вертикальной компоненты скорости воды, приведенные в относительном виде.

Выявлен тип зависимости относительных значений пульсаций динамического давления от вертикальной координаты, а именно увеличение их значений с приближением ко дну потока воды. При этом для потоков бурным режимом течения воды максимальные значения пульсаций динамического давления составляют от 0,18 (канал Туш, створ 13, рис.2–в) до 0,64 (канал Меркенский, створ б, рис.2–з), а минимальные – от 0,05 (канал Туш, створ 13, рис.2–в) до 0,13 (канал Меркенский, створ б, рис.2–з).

Вторая схема расчета обладает следующими преимуществами:

- во-первых, мы избавились от неудачного делителя (нормальное давление – статическая составляющая полного давления), перейдя к более логичному делителю (распределение динамического давления по глубине потока воды);
- во-вторых, что является наиболее важным, характер распределения относительных пульсаций динамического давления по глубине потока совпадает с характером распределения пульсаций компонент скорости воды [4], что неудивительно, так как динамическое давление и его пульсации являются следствием существования в потоке воды инерционных сил.

Сравнительный анализ и обсуждение результатов исследований. В рамках этого анализа составим отношения относительных пульсаций динамического давления к относительным пульсациям продольной компоненты скорости воды (формула 4) и аналогичные отношения, где в качестве делителя использованы относительные пульсации вертикальной компоненты скорости воды (формула 5).

Подобные соотношения записываются в виде

$$\tilde{P}'_{д(2)} / \tilde{u}' = \frac{2 \cdot \left(2,10 \cdot \frac{u_m}{u_*} \cdot \tilde{y}^{1/m} \cdot \phi(\tilde{y}) + 1,05^2 \cdot \psi^2(\tilde{y}) \right)}{\left(\frac{u_m}{u_*} \right)^2 \cdot \tilde{y}^{2/m} + 1,05^2 \cdot \psi^2(\tilde{y})} : \phi(\tilde{y}), \quad (4)$$

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

Результаты расчетов по формулам (4), (5) приведены на рис. 3 и рис.4. соответственно.

Установлено, что характер кривых $\tilde{P}'_d / \tilde{u}'$ и $\tilde{P}'_d / \tilde{v}'$ одинаков и заключается в увеличении искомых отношений с понижением значений вертикальной координаты.

Максимальные значения указанных отношений заключены в пределах от 0,19 (канал Туш, створ 13, рис.3–в) до 0,65 (канал Меркенский, створ б, рис.3–з) для отношения $\tilde{P}'_d / \tilde{u}'$, и от 0,41 (канал Туш, створ 13, рис.4–в) до 2,38 (канал Меркенский, створ б, рис.4–з) для отношения $\tilde{P}'_d / \tilde{v}'$; минимальные значения искомых отношений составляют величины от 0,12 (канал Туш, створ 13, рис.3–в) до 0,31 (канал Меркенский, створ б, рис.3–з) для отношения $\tilde{P}'_d / \tilde{u}'$, и от 0,08 (канал Туш, створ 13, рис.4–в) до 0,20 (канал Меркенский, створ б, рис.4–з) для отношения $\tilde{P}'_d / \tilde{v}'$.

Отсюда можно сделать по крайней мере два важных вывода:

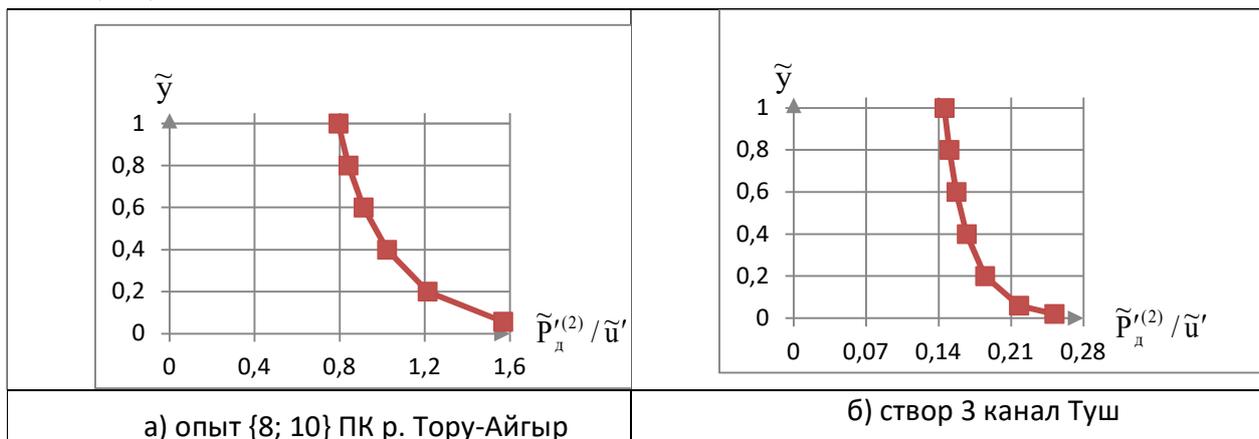
уровень влияния пульсаций динамического давления на перенос количества движения выше при рассмотрении вертикальных перемещений масс воды (действительно $\tilde{P}'_d / \tilde{v}'$ больше $\tilde{P}'_d / \tilde{u}'$);

участие пульсаций динамического давления в рассматриваемом процессе составляет $\approx 0,4$ до 2 от вклада пульсаций вертикальной компоненты скорости воды.

Оценим силу, вызываемую динамическим давлением (оценку произведем на основе материалов бурного течения турбулентного потока воды, при этом используем наибольшие значения динамического давления, наблюдаемые на выступе шероховатости)

$$F_{P_d} = P_d \cdot S = \tilde{P}'_d \cdot P_0 \cdot S \approx 0,27 \cdot 1,01 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 1\text{ м}^2 \approx 2,7 \cdot 1,01 \cdot 10^4 \text{ Па на } 1\text{ м}^2 \quad (6)$$

или $2,7 \cdot 1,01 \cdot 10^3$ кГ силы на 1 м^2 или 270 Г силы на см^2



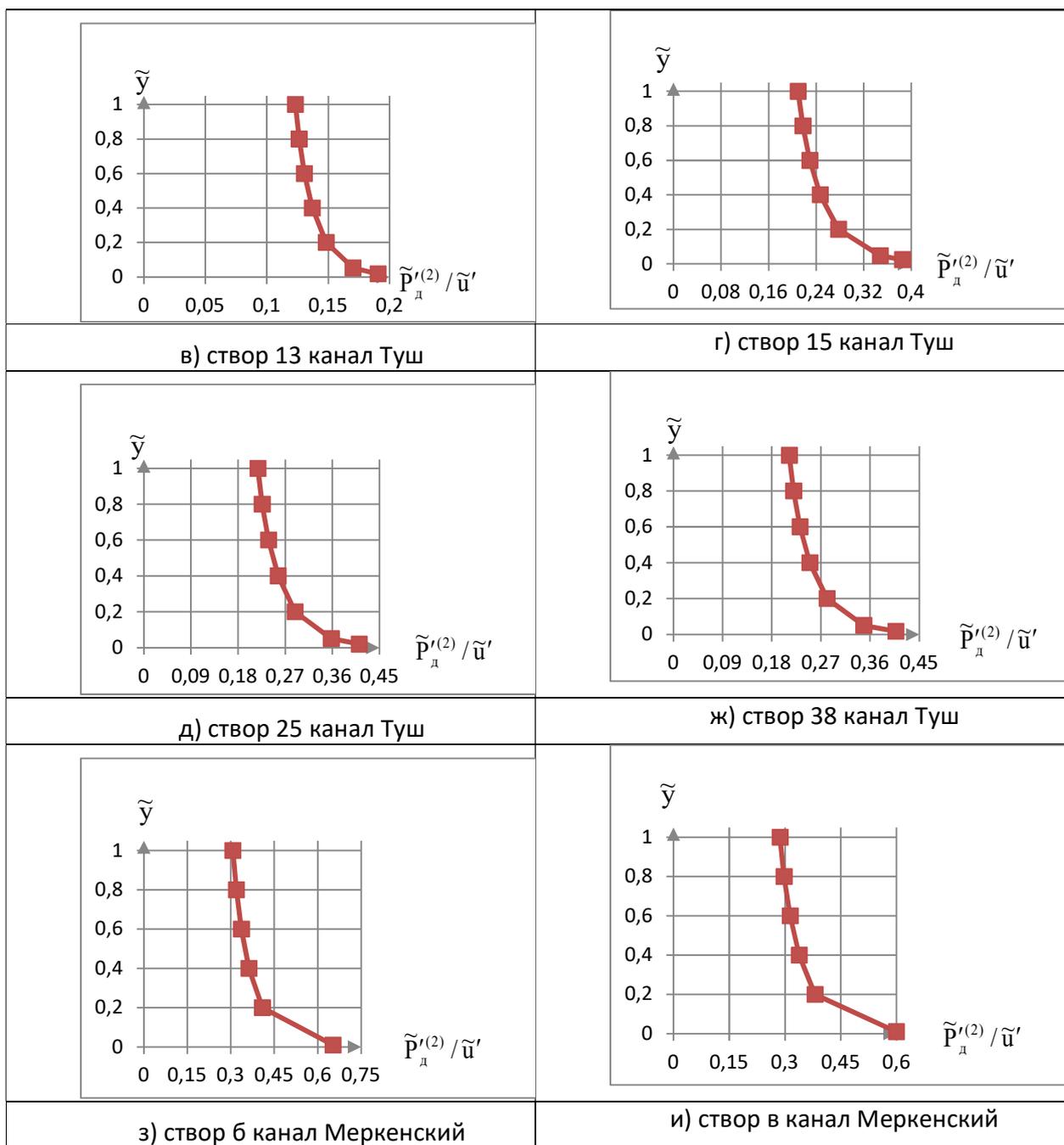
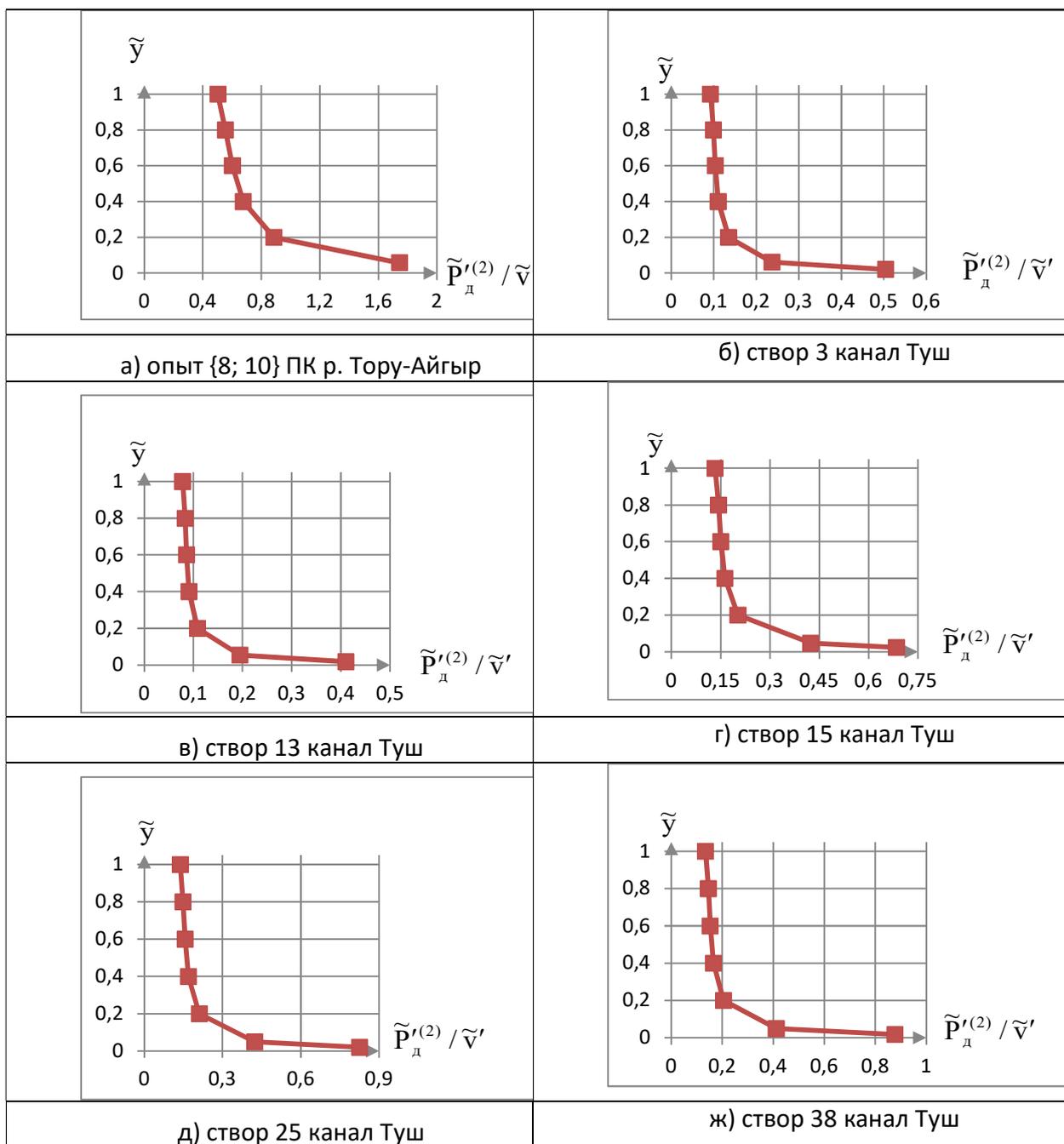


Рисунок 3 – Отношение относительных значений пульсаций динамического давления к относительным значениям пульсаций продольной компоненты скорости в открытом турбулентном потоке воды



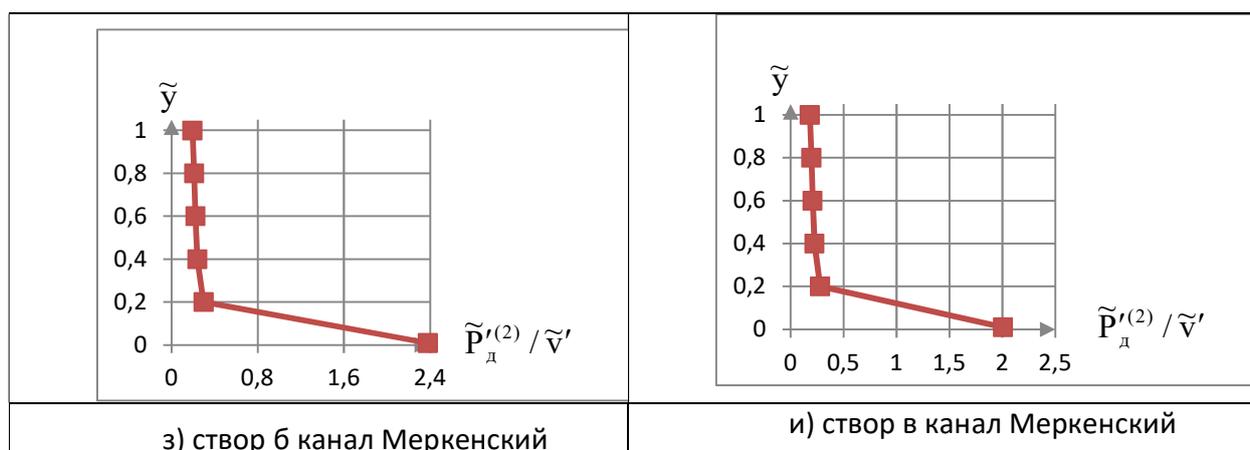


Рисунок 4— Отношение относительных значений пульсаций динамического давления к относительным значениям пульсаций вертикальной компоненты скорости в открытом турбулентном потоке воды

С учетом $F_{p_d} = 1 \text{ Г}$ силы на 1 см^2 [3]. Заметно, что силовое воздействие, развиваемое динамическим давлением ($F_{p_d} = 270 \text{ Г} / \text{см}^2$), на два порядка выше силы, вызываемой пульсациями динамического давления.

Заключение. Установлено распределение динамического давления по глубине потока воды (все это для объектов с бурным режимом течения воды): уменьшение динамического давления с уменьшением вертикальной координаты, максимальные относительные значения в приповерхностном слое воды составляют величины порядка первого и второго знака после запятой, а минимальные относительные значения составляют величины от третьего знака до первого знака после запятой. Выявлено распределение пульсаций динамического давления по глубине потока воды: увеличение пульсаций динамического давления с уменьшением вертикальной координаты. Предварительная оценка величины сил, обусловленных динамическим давлением, составляет 270 Г силы на 1 см^2 , а его пульсаций – 1 Г силы на 1 см^2 (оценка произведена по наибольшим значениям относительного динамического давления и по значениям относительных пульсаций динамического давления на выступе шероховатости).

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. Пресняков К.А., Керимкулова Г.К., Аскалиева Г.О. Пульсации динамического давления в открытом турбулентном потоке воды // Проблемы автоматизации и управления. –2021. –№2(41).
4. Никитин И.К. Турбулентный русловой поток и процессы в придонной области.– Киев: Изд-во АН УССР, 1963.–138с.