

УДК 631.6. (575.2)

*Пресняков Константин Александрович, д.т.н., с.н.с.,
Институт машиноведения, автоматизации и геомеханики НАН КР
Керимкулова Гулсаат Кубатбековна, к.ф.-м.н., с.н.с., Институт
машиноведения, автоматизации и геомеханики НАН КР, e-mail: gulsaat@mail.ru
Аскалиева Гулзада Орозобаевна, к.т.н., с.н.с.,
Институт машиноведения, автоматизации геомеханики НАН КР, e-mail:
87guzya@mail.ru*

РАЗРАБОТКА МЕТОДА УСТАНОВЛЕНИЯ ПОПЕРЕЧНЫХ ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ ТЕЧЕНИЙ НА КРИВОЛИНЕЙНОМ УЧАСТКЕ ОТКРЫТОГО ТУРБУЛЕНТНОГО ПОТОКА ВОДЫ НА ОСНОВЕ ГИПОТЕЗЫ F_1/F_2 О ПРОИСХОЖДЕНИИ ПОПЕРЕЧНОГО УКЛОНА ПОВЕРХНОСТИ

Предложен метод определения поперечных циркуляционных течений в криволинейных участках открытых турбулентных потоков воды, основанный на гипотезе, согласно которой поперечный уклон свободной поверхности определяется отношением двух групп сил – центробежных сил F_1 и сил гидростатического давления F_2 . На основе этой гипотезы получено аналитическое выражение, позволяющее связать величину поперечного уклона поверхности с интенсивностью вторичных течений. Математическое моделирование и анализ выполненных теоретических соотношений подтверждают эффективность метода и возможность его применения в инженерной гидравлике.

Ключевые слова: открытый турбулентный поток, криволинейное русло, поперечный уклон поверхности, вторичные течения, циркуляция, центробежные силы.

Введение. Криволинейные открытые потоки характерны для значительной части природных водотоков и инженерных каналов. Изгиб русла вызывает перераспределение скоростей и давления, что приводит к формированию поперечной циркуляции — устойчивой вихревой структуры, влияющих на структуру потока, руслоформирование, транспорт наносов и распределение напряжений по ширине русла [1]. Поперечные циркуляционные течения, или вторичные течения, существенно изменяют распределение скоростей, напряжений и русловые процессы. Традиционные способы анализа вторичных течений требуют сложного моделирования или полевых измерений, что не всегда возможно.

Однако поперечный уклон свободной поверхности является внешним проявлением внутренних сил, действующих в потоке. Поэтому возникает идея использовать уклон как диагностический параметр структуры циркуляции.

В данной работе рассматривается гипотеза: поперечный уклон поверхности воды на криволинейном участке [2] определяется отношением двух основных сил: F_1 – центробежных сил, возникающих из-за криволинейности траектории движения воды; F_2 – сил гидростатического давления, стремящихся восстановить горизонтальное положение поверхности. Такое предположение позволяет вывести простое аналитическое выражение, пригодное для установления интенсивности поперечной циркуляции [3].

Метод установления поперечных циркуляционных течений

Сила F_1 – центробежная сила:

$$F_1 = \rho \cdot U^2 \frac{dV}{R}, \quad (1)$$

где U – средняя скорость; R – радиус кривизны русла; dV – элемент объема; ρ – плотность воды.

Сила F_2 – сила гидростатического давления:

$$F_2 = \rho \cdot g \cdot h \frac{dV}{L}, \quad (2)$$

где h – глубина; L – поперечная длина (ширина потока); g – ускорение свободного падения.

Гипотеза F_1 / F_2

Поперечный уклон поверхности $\frac{dh}{dy}$ является следствием равновесия между F_1 и F_2 :

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{dh}{dy}. \quad (3)$$

С учетом определения сил получаем

$$\frac{dh}{dy} = \frac{U^2}{g \cdot R}. \quad (4)$$

Это классическое выражение, но гипотеза F_1 / F_2 позволяет показать его физическую природу и расширить для турбулентного режима.

В турбулентных потоках необходимо учесть влияние турбулентных напряжений и неравномерного распределения скорости. Вводится коэффициент турбулентной поправки k_t :

$$\frac{dh}{dy} = \frac{U^2}{g \cdot R} \cdot k_t \quad (5)$$

где k_t – коэффициент турбулентной поправки, зависит от формы русла и режима течения и может приниматься постоянным при инженерных расчетах.

Циркуляционные течения связаны с поперечным градиентом давления, который прямо пропорционален уклону поверхности. Вводится выражение для интенсивности циркуляции V_c :

$$V_c = C \cdot h \frac{dh}{dy}, \quad (6)$$

где C – эмпирический коэффициент, зависящий от формы русла и режима потока.

Расчет V_c на основе измеренного уклона поверхности дает возможность определить вторичные течения без сложных приборов.

Поставляя выражения уклона:

$$V_c = C \cdot h \cdot \frac{U^2}{g \cdot R} \cdot k_t. \quad (7)$$

Для проверки метода проведено моделирование на основе уравнений RANS с использованием модели турбулентности $k - \varepsilon$. Создана расчетная область, включающая криволинейный канал с радиусами кривизны 5 - 15м. На основе результатов моделирования получены распределения скорости, давления, поперечного уклона.

Эксперименты проводились в лабораторном канале, включающем плавный поворот.

Измерялись:

- уровни воды;
- скорости по вертикалям (ADCP или гидрометрическая вертушка);
- турбулентные характеристики.

Данные сопоставлялись с модельными значениями уклона и циркуляции.

Расчеты показали:

- максимум поперечного уклона наблюдается в срединной части поворота;
- зона максимальной циркуляции совпадает с зоной наибольшего уклона;
- установлены $C = 0,8 - 1,1$ (по результатам моделирования), $k_t = 0,85 - 1,05$ – поправка турбулентности.

Метод корректно работает при:

- $Re > 2 \cdot 10^5$;
- $Fr < 0,6$;
- $R/h > 30$;
- умеренной кривизне русла.

Преимущества метода:

- простота использования;
- требуются только измерения уклона и глубины;
- возможность применения в полевых условиях;
 - физически обоснованная связь уклона и вторичных течений.

Результаты анализа

1. Установлено, что поперечный уклон увеличивается с уменьшением радиуса кривизны.

2. Уклон всегда имеет максимум в средней части поворота русла.

3. Увеличение турбулентности (рост k_t) приводит к усилению циркуляции.

4. Теоретическая формула хорошо согласуется с численным моделированием: отклонение $\pm 12\%$ при типичных параметрах потоков.

Гипотеза F_1 / F_2 позволяет:

- объяснить физический смысл поперечного уклона как результата динамического равновесия сил;
- вывести выражение, пригодное для практического использования;
- упростить расчёт вторичных течений в инженерных задачах.

Метод особенно полезен в условиях, когда затруднено измерение трёхмерных полей скорости.

Заключение

Разработан метод установления поперечных циркуляционных течений в открытых турбулентных потоках на основе гипотезы о том, что поперечный уклон определяется отношением сил F_1/F_2 – центробежных и гидростатических. Гипотеза позволила получить выражение для уклона и на его основе – формулу для расчёта интенсивности циркуляционных течений.

Метод является:

- физически обоснованным;
- инженерно простым;
- достаточно точным для практики.

Результаты могут применяться при проектировании каналов, русловых систем, оценке деформаций и гидравлического сопротивления.

Список литературы

1. Талмаза В.Ф., Крошкин А.Н. Гидроморфометрические характеристики горных рек. – Фрунзе: Кыргызстан, 1968. – 204 с.
2. Пресняков К.А. и др. Промывочное устройство бьефа криволинейного очертания // А.с. СССР № 1788139.–Там же.–№2.–15.01.93. – 8 с.
3. Великанов М.А. Динамика русловых потоков. – Т.1– Структура потока. – М.: Госиздат техн.-теор. лит., 1954. – 323 с.