



Научные записки НИЦ МКВК

№27

2024

А.И. Долидудко

Определение средней скорости потока воды в открытых ирригационных каналах относительно поверхностной скорости потока



Научно-информационный центр
Межгосударственной координационной водохозяйственной комиссии
Центральной Азии

А.И. Долидудко

**Определение средней скорости потока
воды в открытых ирригационных
каналах относительно поверхностной
скорости потока**

Ташкент 2024

Введение

Надежная оценка расхода, проходящего через канал, в значительной степени зависит от распределения скорости в определенном поперечном сечении. Однако измерение скорости по всей глубине сечения канала является сложной задачей для высоких потоков. Метод индекса скорости или отношения поверхностной скорости (SVR) является стандартным методом преобразования поверхностной скорости в среднюю скорость для оценки расхода в открытом канале (Patel, 2023).

В гидротехнической практике точное определение средней скорости потока воды в открытых каналах играет ключевую роль при проектировании и эксплуатации ирригационных систем. Средняя скорость является важнейшим параметром, который используется при расчете водоотдачи, управлении водными ресурсами и обеспечении эффективного распределения воды по ирригационным каналам. Однако в реальных условиях измерения скорости потока зачастую производятся только на поверхности, что может приводить к значительным погрешностям при оценке общего водного расхода.

Разница между поверхностной и средней скоростями обусловлена различными факторами, такими как шероховатость дна канала, форма поперечного сечения, уклон канала и турбулентные явления в потоке. Для повышения точности расчетов средней скорости потока важно учитывать эти параметры и применять соответствующие методики корректировки на основе известных эмпирических и теоретических моделей.

В последние годы все большее распространение получают расходомеры дистанционного измерения, такие как доплеровские и ультразвуковые приборы, которые позволяют определять скорость потока без непосредственного контакта с водой. Эти технологии значительно упрощают процесс измерений, особенно на крупных каналах и в труднодоступных местах.

Такие меры направлены на повышение точности и надежности водоучета, оптимизацию водопотребления и водоотведения, а также на улучшение управления водными ресурсами в условиях меняющегося климата и возрастающей антропогенной нагрузки. Применение современных технологий позволяет более эффективно решать задачи управления водными ресурсами, снижать потери воды и обеспечивать устойчивое развитие водохозяйственных комплексов.

В связи с этим широкое применение в определении расхода воды находят ультразвуковые и электромагнитные расходомеры. Расходомеры этого типа дополнены передатчиками ультразвуковых и электромагнитных

сигналов. Скорость прохождения сигнала от передатчика до приемника меняется каждый раз при движении воды. Если сигнал идет по направлению потока, то время уменьшается, если против – увеличивается. По разности времени прохождения сигнала по потоку и против него и рассчитывается объемный расход воды.

К преимуществам данных расходомеров относятся:

- Высокая точность измерений с погрешностью $\pm 1-2$ % (относительная погрешность гидрометрических вертушек 6-12 %);
- Выполнение замеров расхода воды по физическим свойствам по методу «скорость-площадь»;
- Возможность монтажа на различные конструкции, находящиеся над поверхностью воды (гидропосты, гидрометрические мостики, пешеходные, автомобильные, ж/д мосты и т.д.);
- Оперативное получение данных.

К основным недостаткам данных устройств можно отнести:

- Повышенная чувствительность к вибрациям, т.е. при установке оборудования на автомобильных и ж/д мостах, вибрации от проезжающего транспорта могут влиять на точность измерений;
- Восприимчивость к осадкам, поглощающим либо отражающим ультразвук, т.е. в дождливую погоду ультразвуковые сигналы могут отражаться от капель и давать погрешность в измерениях;
- Сложность и высокая стоимость приборов, которая при прочих равных условиях в несколько раз превышает стоимость традиционных методов расчета;
- Необходим доступ к постоянному источнику энергии и связи;
- Измерение на основании поверхностной скорости потока, которая отличается от средней.

Для решения последнего недостатка и направлено данное исследование по определению коэффициента для перехода от измеренных поверхностных скоростей к средней скорости по сечению потока.

Актуальность исследования

Одним из важных аспектов водоучета является понимание и моделирование распределения скоростей в открытых ирригационных каналах. Это необходимо для точного прогнозирования гидродинамического поведения потока, учета водных ресурсов, а также проектирования

гидротехнических сооружений. Несмотря на множество существующих методик и технологий, задача повышения точности расчета средней скорости потока и определения переходного коэффициента от поверхностной скорости к средней остается актуальной.

Метод индекса скорости или отношения поверхностных скоростей (SVR) является стандартным методом преобразования поверхностной скорости в среднюю скорость для оценки расхода в открытом канале, хотя предыдущие исследования предлагали постоянное значение $SVR \approx 0,85$ для определения средней скорости, что не учитывает изменчивость распределения скорости на разных участках канала (Patel, 2023). Поэтому в настоящем исследовании предлагается регрессионная связь между отношением поверхностной скорости, соотношением сторон и относительной шероховатостью канала для объяснения несоответствия в оценке скорости расходомерами.

Настоящая работа посвящена изучению распределения скоростей в открытых ирригационных каналах, а также расчету средней скорости относительно поверхностной скорости потока. Исследование направлено на анализ существующих методик, определение переходного коэффициента и проведение сравнительного анализа для различных гидравлических условий.

Целью исследования является изучение распределения скоростей в открытых ирригационных каналах, а также определение переходного коэффициента от поверхностной скорости к средней скорости потока.

Задачи исследования:

1. Анализ существующих методологий расчета скорости потока в открытых каналах.
2. Определение логарифмического профиля скорости для потоков воды в открытом русле.
3. Вычисление средней скорости потока, используя интеграцию профиля скорости.
4. Расчет переходного коэффициента от поверхностной скорости к средней скорости воды в канале.
5. Проведение сравнительного анализа результатов для каналов с разной глубиной и шероховатостью.

Методика исследования

В данном исследовании использованы общепринятые законы гидравлики и гидродинамики. Расчеты основаны на регрессионном анализе, классических законах гидродинамики, теории и методах расчета скорости в открытых каналах, включая логарифмическое распределение скорости для турбулентного потока и методы интегрирования профиля скорости для определения средней скорости.

Анализ существующих методик

Анализ скорости потока в открытых каналах является важной задачей в гидравлике, так как точное определение скорости необходимо для расчетов расхода воды, проектирования гидротехнических сооружений и управления водными ресурсами. Существуют различные методики расчета скорости потока, каждая из которых имеет свои особенности, преимущества и ограничения.

Выбор метода зависит от конкретных условий потока, доступных данных и требуемой точности. Логарифмический закон скорости и эмпирические методы широко используются в инженерной практике благодаря своей простоте и надежности. Современные численные методы и методы измерений обеспечивают высокую точность, но требуют дополнительных ресурсов и тщательной калибровки.

Рассмотрим существующие методики расчета скорости потока в открытых каналах.

1. Логарифмический закон скорости

Для расчета распределения скоростей и средней скорости в открытых каналах и реках используются несколько моделей, наиболее распространенной из которых является профиль скорости в турбулентном потоке. Открытые каналы и реки обычно имеют турбулентный поток, и поэтому часто используют логарифмический закон скорости для описания их профиля.

Логарифмический профиль скорости является классическим методом, основанным на теории турбулентного потока. Этот метод описывает распределение скорости в зависимости от глубины потока и используется для вычисления средней скорости.

$$u(y) = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{y}{y_0}\right)$$

где

$u(y)$ – скорость на расстоянии y от дна канала,

u_* – скорость трения,

κ – константа Кармана ($\approx 0,41$),

y_0 – параметр, характеризующий шероховатость дна.

Закон изменения скорости от дна канала к поверхности воды в зависимости от глубины и гидравлических характеристик потока приводится в работах ученых с середины XX века. В работах ученых описывается использование логарифмического закона скорости для турбулентных потоков и методы интегрирования для нахождения средней скорости (Henderson, 1966); приводится описание профиля скорости в турбулентном потоке и использование логарифмического профиля для расчета средней скорости (Chow, 1959); дается детальное объяснение логарифмического закона скорости и применение его для расчета средней скорости в турбулентных потоках (Graf, 1984); приводится описание методов анализа турбулентного потока и использования логарифмического профиля скорости (Yalin, 1972).

В последние годы в исследованиях (Smart & Biggs, 2020) использовали логарифмический закон для улучшения методов дистанционного измерения скорости потока, особенно с применением неинвазивных методов, таких как лазерные и акустические измерители. В этих исследованиях изучаются и корректируются модели для реальных условий, таких как каналы с шероховатым дном и турбулентные потоки

Исследования применения логарифмического закона для потоков с различными характеристиками, включая потоки с измененной шероховатостью дна (Khuntia, 2018) подтверждают, что логарифмический закон остается важным инструментом для предсказания распределения скорости в турбулентных потоках, особенно при необходимости учета неоднородности дна.

Преимуществами данного метода является то, что он полезен для моделирования потоков в реках и каналах, поскольку он учитывает изменение скорости потока с глубиной; подходит для анализа турбулентных потоков, а также хорошо описывает распределение скорости в большинстве реальных каналов.

Но также имеет свои недостатки – требует знания параметра шероховатости дна (y_0) и скорости трения (u_*) которые не всегда легко определить, а также меньше подходит для сильно изменяющихся или нестационарных условий потока.

2. Уравнение Шези

Уравнение Шези является одним из наиболее распространенных эмпирических методов расчета скорости потока в открытых каналах. Оно основано на предположении, что скорость потока зависит от уклона канала, гидравлического радиуса и коэффициента Шези, который учитывает шероховатость дна канала:

$$u = C\sqrt{RS}$$

где

u – средняя скорость потока,

C – коэффициент Шези,

R – гидравлический радиус (отношение площади поперечного сечения потока к его смоченному периметру),

S – уклон канала.

Одно из применений уравнения Шези заключается в расчете распределения скоростей на различных глубинах канала. В этом случае поверхность воды имеет наибольшую скорость, и по мере приближения к дну скорость уменьшается (Chen, 2019). Уравнение Шези использовано для оценки скорости потока в каналах с различной шероховатостью дна, определяя изменение скорости в зависимости от глубины потока. Важно отметить, что коэффициент Шези изменяется в зависимости от структуры русла, что позволяет учитывать местные условия потока.

В исследованиях, посвященных дистанционным методам измерения скорости (например, использованием радаров и акустических датчиков), уравнение Шези часто применяется для расчета средней скорости потока на основе измеренной поверхностной скорости. Исследования ученых (Haueet и др., 2018) показали, что средняя скорость потока может быть получена путем корректировки измеренной поверхностной скорости с использованием коэффициента Шези, что особенно важно в условиях высокой турбулентности или при сложных профилях потока. Эти данные

помогают повысить точность гидравлических расчетов в реальных условиях.

В современных условиях, когда растет использование дистанционных методов измерения скорости потока, таких как спутниковые радары, уравнение Шези может играть одну из ключевых ролей. Исследование (Smart & Biggs, 2020) показало, что для корректного определения средней скорости потока необходимо учитывать шероховатость русла и другие факторы, влияющие на коэффициент Шези. Это позволяет получить точную оценку средней скорости, основываясь на поверхностных измерениях, что особенно важно в случаях, когда прямое измерение всей глубины потока затруднено.

Преимуществами данного метода является простота использования и применения в различных условиях, а также широкое распространение и известность среди инженеров.

Но также имеет свои недостатки – коэффициент Шези C зависит от многих факторов и требует калибровки для каждого конкретного случая, а также не учитывает все нюансы распределения скорости в поперечном сечении потока.

3. Уравнение Маннинга

Уравнение Маннинга также является широко используемым эмпирическим методом для расчета средней скорости потока:

$$u = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2}$$

где

u – средняя скорость потока,

n – коэффициент шероховатости Маннинга,

R – гидравлический радиус,

S – уклон канала.

Одним из особенностей уравнения Маннинга является его способность адаптироваться к разнообразным условиям естественных каналов, включая реки с неровными руслами и различной степенью шероховатости дна. Однако, современные исследования продолжают уточнять значения коэффициента Маннинга для различных типов русел

(Dingman, 2002). В таких исследованиях уравнение Маннинга используется для преобразования измеренной поверхностной скорости в среднюю, что позволяет повысить точность гидравлических расчетов.

Преимуществами данного метода является простота и практичность в инженерных расчетах, а также коэффициент Маннинга n имеет таблицы значений для различных типов покрытий и условий канала.

Но также имеет свои недостатки – требует точного определения коэффициента Маннинга n , который может варьироваться в зависимости от условий и не всегда точно отражает сложные потоки с изменяющимися условиями.

4. Метод Железнякова

Метод Железнякова основан на эмпирических данных и предназначен для расчета средней скорости потока в каналах. Основное уравнение имеет вид:

$$u = \alpha(R^{\frac{2}{3}}S^{\frac{1}{2}})$$

где

u – средняя скорость потока,

α – эмпирический коэффициент, который зависит от гидравлических характеристик канала,

R – гидравлический радиус,

S – уклон канала.

Первые работы по структуре потока в сложном открытом русле, определяющие передачу импульса между основным руслом и пойменными потоками, принадлежат Селлину и Железнякову (Fernandes, 2015). Они включает взаимодействие вихрей с вертикальными и горизонтальными осями, влияющее на продольные скорости и пропускную способность или транспортную способность русла.

Дополнительное сопротивление потоку, обусловленное существованием вихрей, впервые было отмечено Г.В. Железняковым, который назвал его «кинематическим эффектом» (Proust, 2019). Начиная с первых работ Селлина (1964) и Железнякова (1965), структура однородных потоков в прямых составных каналах была исследована в лабораторных

условиях (Nicollet & Uan, 1979; Knight & Demetriou, 1983; Knight & Shiono, 1990; Tominaga & Nezu, 1991; Nezu, Onitsuka & Iketani, 1999; Soldini et al. 2004; Ikeda & McEwan, 2009; Stocchino & Brocchini, 2010; Stocchino et al. 2011; Besio et al. 2012; Fernandes, Leal & Cardoso, 2014; Azevedo, Roja-Solórzano & Bento Leal, 2017; Dupuis et al. 2017; Truong, Uijtewaal & Stive, 2019).

Преимуществами данного метода является учет широкого диапазона условий потока и гидравлических характеристик. Кроме того эмпирический коэффициент α может быть адаптирован для конкретных условий канала.

Основным недостатком методики является определение коэффициента α , который может изменяться в зависимости от условий, а также меньшая известность и распространенность по сравнению с уравнениями Шези и Маннинга.

5. Методы численного моделирования. Методы измерений и калибровки

Современные численные методы, такие как CFD (Computational Fluid Dynamics), позволяют моделировать распределение скорости и другие параметры потока в каналах с высокой точностью. А методы измерений, такие как использование расходомеров, позволяют получать данные о скорости потока непосредственно на месте. Современные приборы, такие как доплеровские расходомеры, позволяют измерять скорость потока на различных глубинах и интегрировать эти данные для расчета средней скорости.

Преимуществами данных методов является высокая точность, детализация результатов, возможность моделирования сложных и нестационарных условий, а также подходят для различных условий потока и типов каналов.

Но также имеют свои недостатки – требует значительных вычислительных ресурсов и времени, сложность настройки и калибровки модели и приборов, а также необходимо регулярно проводить измерения для учета изменяющихся условий.

В связи с тем, что данное исследование является инструментально-аналитическим и основано на минимуме полевых измерений данные методы не рассматриваются.

Материалы и методы исследования

Исходя из проведенного анализа существующих методик расчета скорости потока в открытых каналах, воспользуемся методикой Г.В. Железнякова, т.к. данная методика учитывает широкий диапазон условий потока и гидравлических характеристик, а также основана на логарифмический законе скорости, включает в себя коэффициент Шези и уравнение Маннинга.

Методика, описанная Г.В. Железняковым, является важным вкладом в гидравлические расчеты, особенно для анализа скоростей течений в открытых каналах. Основной принцип методики заключается в эмпирическом определении распределения скоростей потока в каналах с различной степенью шероховатости дна и боковых стенок. Основные параметры методики включают использование специальных коэффициентов, характеризующих структуру и плотность руслового потока, что позволяет учитывать влияние как шероховатости дна, так и формы поперечного сечения канала.

Для начала рассмотрим распределение скоростей в живом сечении потока для определения средней скорости воды на вертикали. Для выполнения гидравлических расчетов потоков воды в канале необходимо выделить характерные скорости: среднюю и максимальную скорость на вертикали; среднюю скорость по сечению, среднюю поверхностную скорость.

Абсолютное значение скоростей, направление, распределение в потоке зависит от степени шероховатости дна и откосов, их формы, водной растительности, ледяного покрова и ветра, а также рельефа дна в плане.

В природе практически не встречаются естественные русла с установившимся режимом движения, при котором глубина и скорости остаются неизменными. Кинематика естественных потоков непосредственно связана с проблемой гидрологических сопротивлений (Корпачев, 2009). Поэтому исследование закономерностей распределения скоростей в естественных потоках базируется на схематизации естественных потоков, т.е. создании вначале абстрактной модели потока, разработке теории и, наконец, экспериментальной проверке с определением параметров уравнений на основе обобщения гидрометрических данных.

Для определения средней скорости на вертикали воспользуемся математической моделью расхода потока воды. Площадь, ограниченная кривой $u=u(y)$, дном потока, поверхностью воды и линией глубины h (рис. 1), представляет собой по размерности расход воды q на единицу ширины

потока и называется расходом воды на вертикали. Таким образом, расход воды на вертикали равен:

$$q = \int_0^h u dy = \int_0^1 u d\eta \quad (1)$$

Где

h – глубина волны на вертикали;

$\eta = \frac{y}{h}$ – относительная глубина на вертикали, изменяющаяся от нуля до единицы. При этом при значении $\eta = 0$ местная осредненная во времени скорость u равна донной скорости u_d , а при $\eta = 1,0$ $u = u_{\max}$, то есть равна наибольшей скорости на поверхности воды.

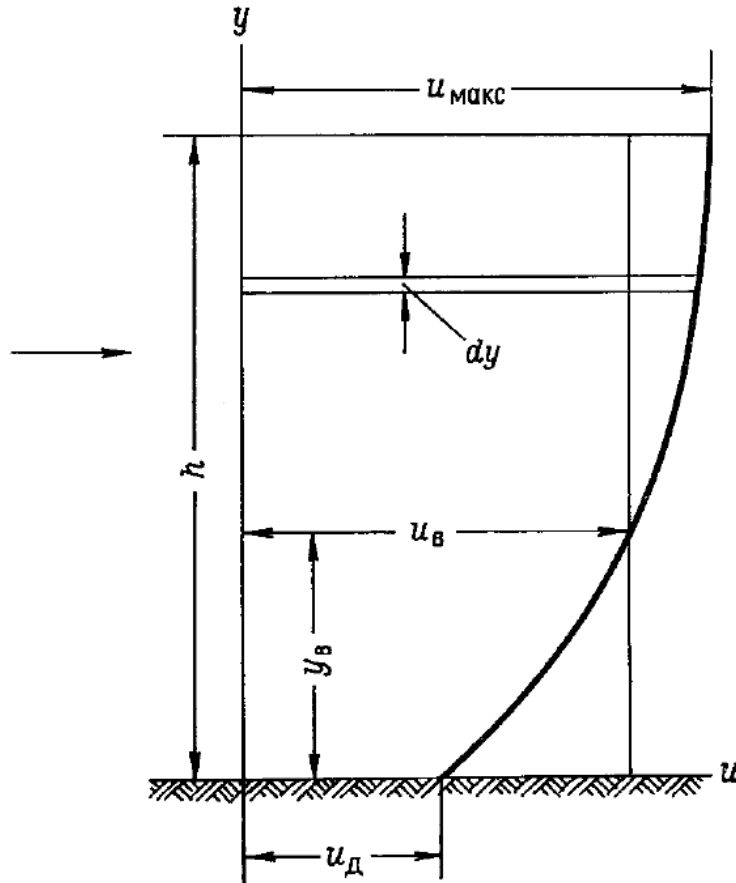


Рис. 1. Профиль скоростей безнапорного потока

Средняя скорость на вертикали представляет отношение расхода воды на вертикали q к глубине потока h , т.е.

$$u_B = \int_0^h u d\eta = \frac{q}{h} \quad (2)$$

Таким образом, аппроксимирующее уравнение для расхода воды, записанное для профиля скоростей (рис. 1) будет иметь следующий вид:

$$Q = \int_0^B q db \quad (3)$$

где

q – расход воды на вертикали, численно равный площади ограниченной эпюрой $q = q(b)$;

B – ширина потока;

db – элементарная ширина.

Интеграл (3) численно равен площади ограниченной эпюрой $q = q(b)$ и линией поверхности воды. Поэтому среднюю скорость потока можно определить из выражения

$$u = \frac{1}{\omega} \int_0^B q db = \frac{1}{\omega} \int_0^B u_B h db \quad (4)$$

Исходя из этого, средняя поверхностная скорость определится из выражения

$$u_{\text{пов}} = \frac{1}{\omega} \int_0^B u_{\text{max}} h db \quad (5)$$

Для практических расчетов соотношение между средней по сечению скоростью u и средней (по ширине потока) поверхностной скоростью $u_{\text{пов}}$ по исследованиям Г.В.Железнякова, выражается так:

$$\frac{u}{u_{\text{пов}}} = K_1 = \frac{(2,3\sqrt{g}+0,3C)C}{(3,3\sqrt{g}+0,3C)+g} \quad (6)$$

Данное соотношение широко пользуются в гидрометрии для перехода от измеренных поверхностных скоростей к средней скорости по сечению.

Для упрощения расчетов формулу (6) аппроксимируем в виде:

$$K_1 = 0,61(C^*)^{0,125} \quad (7)$$

где

$$C^* = \frac{C}{\sqrt{g}} - \text{безразмерный коэффициент Шези.}$$

Для каналов $R < 3 \div 5$ м коэффициент Шези C можно принимать по формуле Н.Н. Павловского:

$$C = \frac{1}{n} R^y \quad (8)$$

где

n – коэффициент шероховатости;

R – гидравлический радиус;

y – переменный показатель степени, равный

$$y = 2,5\sqrt{n} - 0,13 - 0,75\sqrt{R}(\sqrt{n} - 0,10) \quad (9)$$

Однако, применение формулы Н.Н. Павловского при больших гидравлических радиусах и других значениях коэффициентов шероховатости в гидравлических расчетах может привести к грубым ошибкам. В связи с этим Г.В. Железняков для определения коэффициента Шези рекомендует использовать следующую формулу:

$$C = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{n} - \frac{\sqrt{g}}{0,13} (1 - \lg R) \right] + \sqrt{\frac{1}{4} \left[\frac{1}{n} - \frac{\sqrt{g}}{0,13} (1 - \lg R) \right]^2 + \frac{\sqrt{g}}{0,13} \left(\frac{1}{n} + \sqrt{g} \lg R \right)}$$

Достоинство формулы Г.В. Железнякова состоит в том, что она может применяться при любых значениях n и R . Данная формула

справедлива и для речных потоков, при этом можно принять $R \approx h_{cp}$. Ввиду сложного вида этой формулы возможно использование таблицы (табл.) для определения C в зависимости от n и R .

Таблица 1

Коэффициенты Шези C по формуле Г.В. Железнякова

$R (h_{cp}), \text{ м}$	n							
	0,015	0,02	0,025	0,03	0,04	0,05	0,08	0,1
0,1	49,2	34,5	26,0	20,5	14,1	10,5	5,47	3,92
0,2	54,3	38,7	29,7	23,8	16,8	12,7	7,00	5,20
0,3	57,3	41,4	32,1	26,0	18,6	14,3	8,09	6,13
0,4	59,5	43,4	33,9	27,6	20,0	15,5	8,98	6,89
0,5	61,2	44,9	35,3	28,9	21,1	16,5	9,73	7,54
0,6	62,6	46,2	36,5	30,0	22,7	17,4	10,4	8,12
0,7	63,8	47,4	37,6	31,0	22,9	18,1	11,0	8,65
0,8	64,9	48,3	38,4	31,8	23,7	18,8	11,5	9,13
0,9	65,8	49,2	39,3	32,6	24,4	19,4	12,0	9,58
1,0	66,7	50,0	40,0	33,3	25,0	20,0	12,5	10,0
1,2	68,2	51,4	41,3	34,5	26,1	21,0	13,3	10,8
1,4	69,4	52,6	42,4	35,6	27,1	21,9	14,1	11,4
1,6	70,5	53,6	43,4	36,5	27,9	22,7	14,8	12,1
1,8	71,5	54,5	44,3	37,4	28,7	23,4	15,4	12,6
2,0	72,4	55,4	45,1	38,1	29,4	24,1	16,0	13,2
2,5	74,3	57,1	46,8	39,8	31,0	25,6	17,2	14,4
3,0	75,8	58,6	48,2	41,1	32,2	26,8	18,3	15,4
3,5	77,1	59,9	49,4	42,3	33,3	27,8	19,3	16,3
4,0	78,3	61,0	50,5	43,3	34,3	28,8	20,2	17,1
4,5	79,3	61,9	51,4	44,2	35,2	29,6	20,9	17,9
5,0	80,2	62,8	52,2	45,1	36,0	30,4	21,6	18,6
5,5	81,0	63,6	53,0	45,8	36,7	31,1	22,3	19,2
6,0	81,8	64,4	53,7	46,5	37,4	31,7	22,9	19,8
6,5	82,5	65,0	54,4	47,2	38,0	32,2	23,5	20,4
7,0	83,1	65,6	55,0	47,8	38,6	32,9	24,0	21,0

$R (h_{cp}), \text{ м}$	n							
	0,015	0,02	0,025	0,03	0,04	0,05	0,08	0,1
7,5	83,7	66,2	55,6	48,3	39,1	33,4	24,5	21,4
8,0	84,3	66,8	56,1	48,8	39,6	33,9	25,0	21,9
8,5	84,8	67,3	56,6	49,4	40,1	34,4	25,4	22,3
9,0	85,4	67,8	57,1	49,8	40,6	34,8	25,9	22,7
9,5	85,8	68,3	57,6	50,3	41,0	35,3	26,3	23,1
10,0	86,3	68,7	58,0	50,7	41,4	35,7	26,7	23,5
11,0	87,1	69,5	58,8	51,5	42,2	36,4	27,4	24,2
12,0	87,9	70,3	59,5	52,2	42,9	37,2	28,1	24,9
13,0	88,6	71,0	60,2	52,9	43,6	37,8	28,7	25,5
14,0	89,3	71,6	60,9	53,5	44,2	38,4	29,3	26,1
15,0	89,9	72,2	61,5	54,1	44,8	39,0	29,9	26,7
16,0	90,5	72,8	62,0	54,6	45,3	39,5	30,4	27,2
17,0	91,0	73,3	62,5	55,2	45,8	40,0	30,9	27,7
18,0	91,6	73,8	63,0	55,7	46,3	40,5	31,4	28,2
19,0	92,0	74,3	63,5	56,1	46,8	40,9	31,8	28,6
20,0	92,5	74,8	64,0	56,6	47,2	41,4	32,2	29,0

Примечание: Погрешность значений коэффициента Шези между расчетной формулой и таблицей составляет 0,06%.

Коэффициенты шероховатости n каналов и естественных водотоков принимаем согласно ШНК 2.06.03-12 «Оросительные системы. Нормы проектирования» (Приложение).

Результаты и обсуждение исследования

Ирригационные каналы в основном делятся на каналы в земляном русле, из бетона, железобетона (монолитного или сборного), а также применяют различные экраны из полимерных плёнок¹. Так как в мировой практике, в основном, используют каналы с бетонной облицовкой и каналы в земляном русле (Enrique V. G.), в качестве примера рассмотрим данные два условия.

Для начала при расчете значения переходного коэффициента от поверхностной скорости к средней скорости потока необходимо

¹ Распределительные проводящие каналы // <http://www.cawater-info.net/bk/4-2-1-2-4.htm>

определить коэффициент шероховатости. Используя ШНК 2.06.03-12 (Приложение) коэффициент шероховатости принимаем $n = 0,015$ – для каналов с бетонной облицовкой и $n = 0,025$ – для каналов в земляном русле со свободным течением, незасоренных, прямых в плане.

Имея коэффициент шероховатости n , находим коэффициент Шези C (из табл.) для каждой глубины канала h_{cp} . Подставляя имеющиеся значения в формулу (7) составляем график зависимости $K_I = f(h)$ (рис. 2, 3). В результате получаем переходный коэффициент K_I от поверхностной скорости к средней скорости потока для каждой глубины канала.

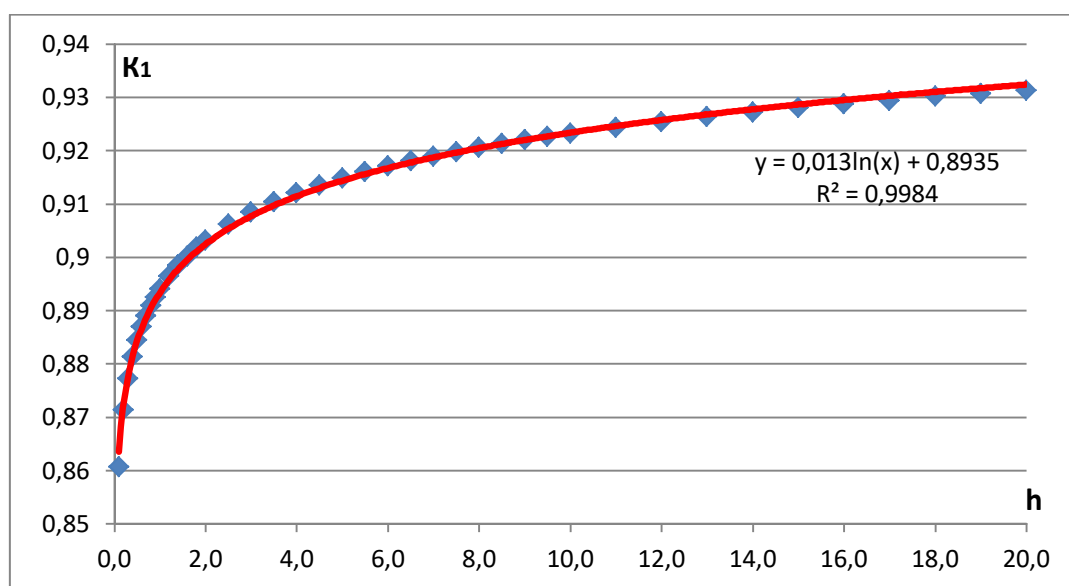


Рис. 2. График зависимости $K_I = f(h)$ при $n = 0,015$ для $h = 0,1 \div 20,0$ м

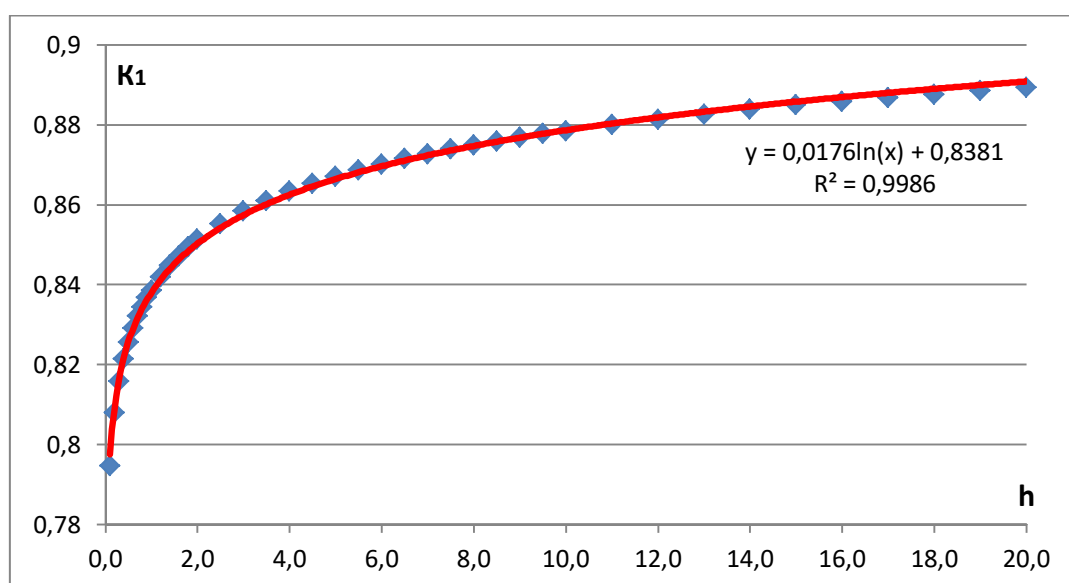


Рис. 3. График зависимости $K_I = f(h)$ при $n = 0,025$ для $h = 0,1 \div 20,0$ м

Как видно по графикам при изменении глубин от 0,1 м до 20,0 м величина переходного коэффициента изменяется в пределах 0,86÷0,93 для каналов с бетонной облицовкой и 0,79÷0,89 – для каналов в земляном русле.

Но так как глубина каналов в основном не превышает 5 м составляем график зависимости $K_I = f(h)$ в пределах $h = 0,1 \div 5,0$ м (рис. 4, 5).

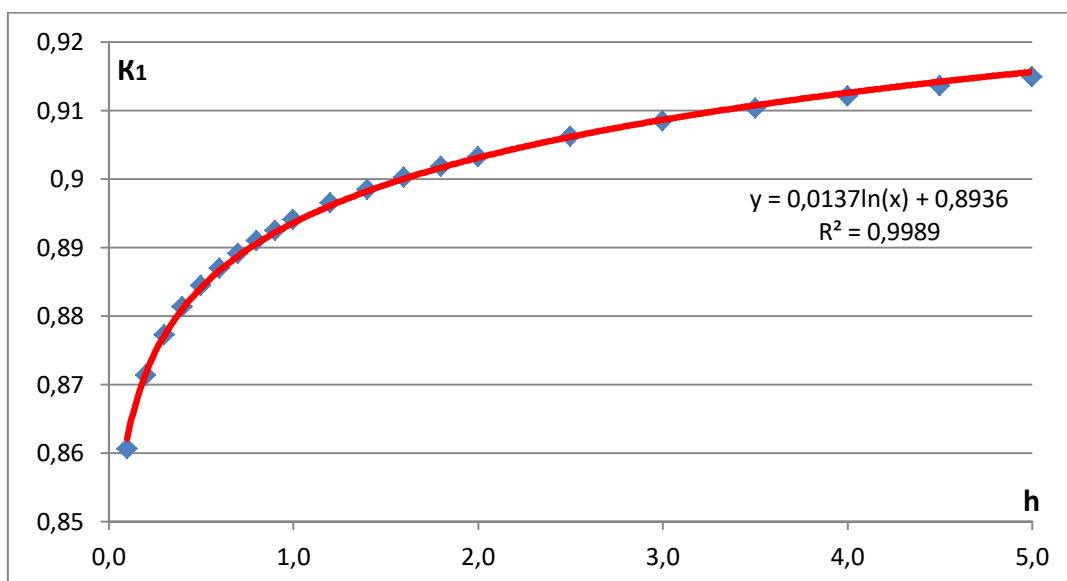


Рис. 4. График зависимости $K_I = f(h)$ при $n = 0,015$ для $h = 0,1 \div 5,0$ м

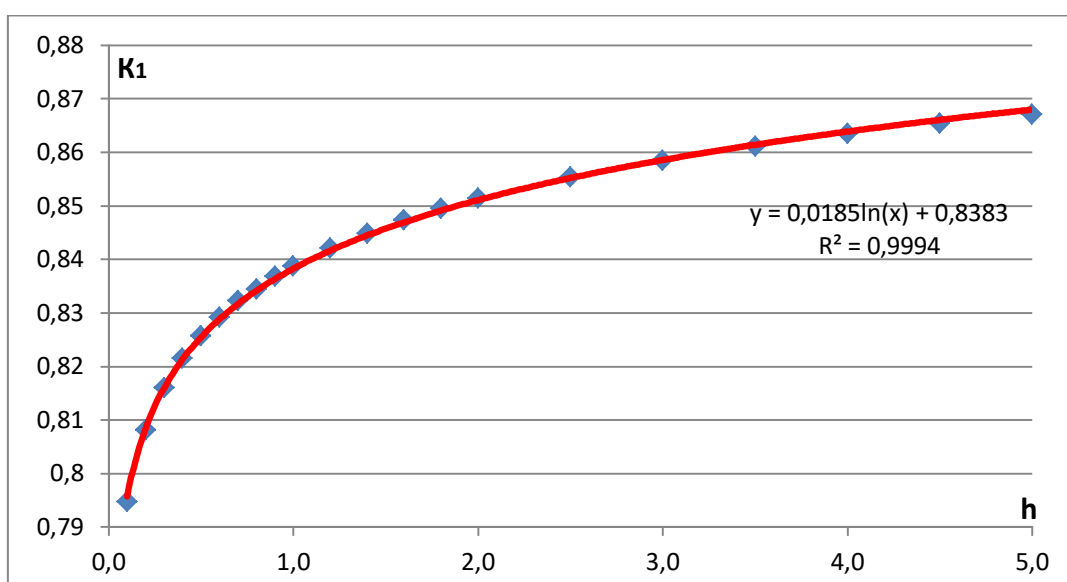


Рис. 5. График зависимости $K_I = f(h)$ при $n = 0,025$ для $h = 0,1 \div 5,0$ м

Как показывают графики, при изменении глубин от 0,1 м до 5,0 м величина переходного коэффициента изменяется в пределах 0,86÷0,915 для каналов с бетонной облицовкой и 0,79÷0,867 – для каналов в земляном русле.

Данные расчеты можно применить для различных типов ирригационных каналов. Для расчета необходимо будет выбрать подходящий коэффициент шероховатости русла канала и построить график зависимости $K_I = f(h)$ для рассматриваемого канала.

Выводы и предложения

1. Предлагаемый метод определения переходного коэффициента от поверхностной скорости к средней скорости потока является инструментально-аналитическим. Он основан на минимуме полевых измерений и предполагает большую аналитическую работу по изучению распределения скоростей в живом сечении потока.

2. Особое внимание следует уделить применению переходного коэффициента от поверхностной скорости к средней скорости потока K_I при использовании ультразвуковых и электромагнитных расходомеров, измеряющих поверхностную скорость. Расход воды при измерении только поверхностных скоростей необходимо рассчитывать по формуле $Q = K_I V_{\text{пов}} \omega$, м³/с. Корректировка данных с помощью переходного коэффициента позволяет значительно повысить точность водоучета.

3. Учитывая тот факт, что средняя глубина большинства ирригационных каналов составляет от 1,0 до 2,0 метров, значение переходного коэффициента для каналов с бетонной облицовкой можно принимать $K_I = 0,9$; для каналов в земляном русле $K_I = 0,85$.

4. Современные численные методы и методы измерений обеспечивают высокую точность, но требуют дополнительных ресурсов и тщательной калибровки. В связи с этим, особое внимание следует уделить необходимости проведения реальных замеров скорости потока в открытых ирригационных каналах для сравнения теоретически полученных результатов с фактическими данными. Такие измерения позволяют оценить точность выбранных методик и при необходимости корректировать эмпирические коэффициенты, используемые в расчетах.

Литература

1. Chen, Y., Zhang, X., Li, J., & Wang, L. (2019). Application of Manning and Chezy equations for flow velocity estimation in channels with vegetated beds. *Journal of Hydraulics and Water Resources*, 45(2), 124-130.
2. Chow, V. T. (1959). *Open-Channel Hydraulics*.
3. Dingman, Stanley & Bjerklie, David & Bolster, C. & Clarner, P.. (2002). What is the Constitutive Equation for One-Dimensional Open-Channel Flow. AGU Fall Meeting Abstracts.
4. Enrique Bonet Gil. (2018). *Experimental Design and Verification of a Centralized Controller for Irrigation Canals*. ISTE Press – Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2017-0-01444-1>
5. Fernandes, Joao & Leal, Joao & Cardoso, António. (2015). Assessment of stage-discharge predictors for compound open-channels. *Flow Measurement and Instrumentation*. 45. 10.1016/j.flowmeasinst.2015.04.010.
6. Graf, W. H. (1984). *Hydraulics of Sediment Transport*.
7. Hauet, A., Moatar, F., & Chauveau, M. (2018). Calibration of flow measurement systems using remote sensing and Chezy equation. *Water Resources Management*, 32(6), 1112-1130.
8. Henderson, F. M. (1966). *Open Channel Flow*. Macmillan Publishing Co.
9. Khuntia, J.R., Devi, K. & Khatua, K.K. Prediction of depth-averaged velocity in an open channel flow. *Appl. Water Sci.* **8**, 172 (2018). <https://doi.org/10.1007/s13201-018-0812-9>
10. Patel, P., Kar, R., Sarkar, A. (2023). Estimation of Velocity Index for Flow Calculation in Open Channels Using Geometric and Hydraulic Characteristics. *Fluid Mechanics and Hydraulics. HYDRO 2021. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 314. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-9151-6_19
11. Proust S, Nikora VI. Compound open-channel flows: effects of transverse currents on the flow structure. *Journal of Fluid Mechanics*. 2020; 885:A24. doi:10.1017/jfm.2019.973.
12. Sellin, R. H. J. 1964 A laboratory investigation into the interaction between the flow in the channel of a river and that over its flood plain. *La Houille Blanche* 7, 793–802.
13. Smart, Graeme & Biggs, Hamish. (2020). Smart, G. & Biggs, H. (2020). Remote gauging of open channel flow: Estimation of depth averaged

velocity from surface velocity and turbulence. Proceedings of River Flow 2020, Delft, Netherlands.

14. Yalin, M. S. (1972). Mechanics of Sediment Transport.
15. Железняков Г.В. «О расчете удельной кинетической энергии речного потока». –Изв. АН СССР, «Энергетика и транспорт», №5. М.–1965.
16. Железняков Г.В. «Теория гидрометрии». Л.: Гидрометеиздат, 1976. –344 с.
17. Карасев И.Ф., Савельева А.В., Ременюк В.А. «Расход воды на реках и каналах». Методика выполнения измерений методом «скорость-площадь». Методические указания. МИ 1759-87. Издательство стандартов. М. –1987.
18. Корпачев В.П. «Теоретические основы водного транспорта леса» М.-2009.
19. Мазур Г.С. Определение расходов воды речных потоков при минимуме полевых измерений. Серия «Науки о Земле» 2009. Том 1, № 1. С. 93–106
20. Шараев Г.И. Водный транспорт леса: курс лекций для студентов специальности 250401.65 Лесоинженерное дело, направления 250300 Технология и оборудование лесозаготовительных и деревообрабатывающих производств очной и заочной форм обучения. / Шараев Г.И. – Лесосибирск: Лф СибГТУ, 2011. –222 с.
21. ШНК 2.06.03-12. «Оросительные системы. Нормы проектирования». Госархитектстрой РУз. Ташкент, 2012.

**Коэффициенты шероховатости «n» каналов
и естественных водотоков**

Таблица 1

Расход воды в канале, м ³ /с	Коэффициенты шероховатости «n» оросительных каналов в земляном русле	
	в связных и песчаных грунтах	в гравелисто-галечниковых грунтах
Более 25	0,0200	0,0225
1-25	0,0225	0,250
Менее 1	0,0250	-
Каналы постоянной сети периодического действия	0,0275	-
Оросители	0,0300	-

Примечания:

1. Для каналов водосборно-сбросной сети значение коэффициента шероховатости повышается на 10% по сравнению со значением того же коэффициента для оросительных каналов и округляется до ближайшего принятого в таблице значения.
2. Для каналов, выполняемых взрывным способом, значение коэффициента шероховатости повышается на 10-20% в зависимости от размеров принимаемой доработки сечений канала.

Таблица 2

Характеристика поверхности ложа канала	Коэффициенты шероховатости «n» каналов в скале
Хорошо обработанная поверхность	0,02-0,025
Посредственно обработанная поверхность без выступов	0,03-0,35
То же, с выступами	0,04-0,045

Таблица 3

Облицовка	Коэффициенты шероховатости «n» каналов с облицовкой
Бетонная хорошо отделанная	0,012-0,014
Бетонная грубая	0,015-0,017
Сборные железобетонные лотки	0,012-0,015
Покрытия из асфальто-битумных материалов	0,013-0,016
Одернованное русло	0,03-0,035

Таблица 4

Характеристика русла	Коэффициенты шероховатости «n» естественных водотоков	Характеристика русла	Коэффициенты шероховатости «n» естественных водотоков
Естественное русло в благоприятных условиях (чистое, прямое, незасоренное земляное, со свободным течением)	0,025-0,033	Заросшие участки рек с очень медленным течением и глубокими промоинами	0,05-0,08
То же, с камнями	0,03-0,04	Заросшие участки рек болотного типа (заросли, кочки, во многих местах почти стоячая вода и пр.)	0,075-0,15
Периодические потоки (большие и малые) при хорошем состоянии поверхности и формы ложа	0,033	Поймы больших и средних рек, сравнительно разработанные, покрытые растительностью (травы, кустарники)	0,05
Земляные русла сухих логов в относительно благоприятных условиях	0,04	Значительно заросшие поймы со слабым течением и большими глубокими промоинами	0,08
Русла периодических водотоков, несущих во время паводка заметное количество наносов	0,05	То же, с неправильным косоструйным течением и большими заводьями и др.	0,1

Характеристика русла	Коэффициенты шероховатости «п» естественных водотоков	Характеристика русла	Коэффициенты шероховатости «п» естественных водотоков
крупно-галечниковых или покрытым растительностью ложем, периодические водотоки, сильно засоренные и извилистые			
Чистое извилистое ложе с небольшим числом промоин и отмелей	0,033-0,045	Поймы лесистые со значительными мертвыми пространствами, местными углублениями, озерами и др.	0,133
То же, но слегка заросшее и с камнями	0,035-0,05	Глухие поймы, сплошные заросли (лесные, таежного типа)	0,2