

гии и технические средства орошения: справочник / Г. В. Ольгаренко [и др.]. – М.: Росинформагротех, 2015. – 264 с.

14 Гигиенические требования к использованию сточных вод и их осадков для орошения и удобрения: СанПиН 2.1.7.573-96 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://consultant.ru/document/cons_doc_LAW_100650.

УДК 626.821.3

Г. Л. Лобанов

Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, Новочеркасск,
Российская Федерация

МЕТОДЫ РАСЧЕТА УСТОЙЧИВОГО РУСЛА КРУПНЫХ МЕЛИОРАТИВНЫХ КАНАЛОВ В ЗЕМЛЯНОМ РУСЛЕ

Целью исследований являлось определение устойчивого сечения крупного мелиоративного канала. Опыт эксплуатации таких каналов у нас и за рубежом показал, что сечение каналов, как правило, деформируется, что влечет за собой снижение пропускной способности и создание аварийных ситуаций. Путем анализа существующих в настоящее время методов расчета крупных мелиоративных каналов были выявлены их недостатки и предложен метод расчета устойчивого русла с использованием распределения скорости потока на вертикали логарифмического типа, базирующегося на полуэмпирической теории турбулентности Прандтля – Кармана, и устойчивости откоса по методу влекущей силы.

Ключевые слова: мелиоративный канал, незаиляющие и неразмывающие скорости, параметр Шези, касательное напряжение, гидравлический радиус, коэффициент шероховатости, метод влекущей силы.

G. L. Lobanov

Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems, Novocherkassk,
Russian Federation

CALCULATION METHODS OF A STABLE CHANNEL OF LARGE RECLAMATION CANALS IN EARTH CHANNEL

The aim of research was to determine the stable cross section of a large reclamation canal. The experience of such canals operation in Russia and abroad showed that as a rule the cross-section of the canal is deformed, that leads to capacity reduction and creation of emergency situations. By analyzing the currently existing methods for calculating large reclamation canals, their shortcomings were revealed and a method for calculating the stable channel using the flow velocity distribution on a logarithmic vertical based on the semi-empirical theory of the Prandtl-Karman turbulence and slope stability by the method of boundary shear was proposed.

Key words: reclamation canal, nonsilting and nonerosive velocities, Chezie parameter, shearing pressure, hydraulic radius, roughness coefficient, method of boundary shear.

Опыт эксплуатации крупных мелиоративных каналов в земляном русле в нашей стране и за рубежом (Терско-Кумского, Каракумского, канала Иртыш – Караганда и др.) указывает на их неудовлетворительное состояние. Каналы, как правило, деформируются, что влечет за собой снижение пропускной способности и создание аварийных ситуаций. Это в свою очередь требует крупных капиталовложений для устранения причин деформаций и их последствий. Основная причина такого положения предопределена еще при проектировании (неправильно выбраны параметры этих каналов). Объясняется это тем, что ни один из существующих сегодня методов проектирования кана-

лов на прямолинейных участках: метод допустимых скоростей, метод допустимых касательных напряжений, метод гидроморфологических зависимостей и смешанные методы – по своей сути не отражает в достаточной мере сложной физики взаимодействия потока и русла канала с большой пропускной способностью. Естественно, что установленные по этим методам параметры каналов, а также формы их поперечных сечений не могут обеспечить полностью условий для соблюдения требований, предъявляемых к каналам как инженерным сооружениям: пропуск воды в заданном интервале, сохранение первоначальной формы поперечного профиля или цикличное изменение этой формы в допустимом диапазоне, сохранение каналом неизменного планового положения.

Наиболее распространенным методом проектирования каналов в нашей стране является метод допустимых скоростей. По этому методу расчетную среднюю скорость (V_p) по сечению назначают в диапазоне между незаиляющей и размывающей скоростями [1]:

$$V_z < V < V_p,$$

где V_z – незаиляющая скорость для поступающих в канал взвешенных наносов, м/с;

V – средняя по сечению скорость, м/с;

V_p – допускаемая размывающая скорость для грунтов дна и откосов канала, м/с.

Соотношение между расходом, уклоном и площадью живого сечения потока устанавливаются по формуле Шези:

$$Q = \omega \cdot c \sqrt{RJ},$$

где Q – расход воды в канале, м³/с;

ω – площадь живого сечения, м²;

c – параметр Шези, м^{0.5}/с;

R – гидравлический радиус, м;

J – уклон дна канала.

Для определения средней по сечению размывающей скорости используют формулу Ц. Е. Мирцхулавы. Незаиляющую скорость определяют по формулам И. И. Леви, С. Х. Абальянца и др.

Для крупных каналов ($Q > 50$ м³/с) применение метода допустимых скоростей связано со следующими трудностями:

- при одной и той же расчетной средней скорости можно назначить разнообразные формы поперечного сечения, удовлетворяющие формуле Шези, поэтому некоторые из них окажутся неустойчивыми, т. е. средняя скорость для всего русла не оценивает устойчивость дна и откосов в отдельности;

- не учитывается влияние взвешенных наносов на гидравлические сопротивления и на устойчивость русла канала;

- слабым местом является определение параметра Шези. Его рассчитывают по формулам Гангиле – Куттера, Маннинга, Н. Н. Павловского, И. И. Агроскина, А. Д. Альтшуля, С. Х. Абальянца и др.

Метод эпюр скоростей Г. П. Скребкова [2, 3] следует отнести к группе методов допускаемых скоростей. Метод рассматривает только несвязанные грунты. Отличие метода от метода допустимых скоростей в том, что в расчетах не используются понятия гидравлического радиуса и средней скорости потока. Как отмечает автор, при расчете по этому методу вместо средней скорости потока рассматривается средняя скорость на вертикали, вместо допустимой скорости потока – допустимая скорость на той же вертикали, а вместо среднего для всего русла коэффициента шероховатости – действительные местные коэффициенты шероховатости. Размывающая скорость определяется по формуле В. Е. Короткова [4]. Основное условие устойчивости – сохранение скорости на центральной вертикали по величине не более размывающей. Далее с ис-

пользованием формулы Шези строится связь $h_{\max} = f(J)$. Задача решается подбором, путем вариации значений коэффициентов заложения откосов. Опытного подтверждения связи $h_{\max} = f(J)$ не имеется, а о недостатках формул Шези говорилось выше.

Метод допустимых касательных напряжений (метод влекущей силы) получил большое распространение в США. Решения получены для каналов, проходящих в несвязанных грунтах. Принципиально метод может быть применен и для случая связанных грунтов. Суть метода заключается в следующем. Гидравлические потери, как и в методе допустимых скоростей, определяются из формулы Шези. Дальнейшее касается выбора формы устойчивого сечения. Удельная влекущая сила (касательное напряжение) равна:

$$\tau = \gamma \cdot R \cdot J,$$

где γ – удельный вес воды, кг/м³.

Для широких открытых каналов $R \approx H$, тогда:

$$\tau = \gamma \cdot H \cdot J,$$

где H – средняя глубина, м.

В канале конечной ширины имеют место соотношения:

$$\tau_d = k_d \cdot \gamma \cdot H \cdot J, \quad (1)$$

$$\tau_o = k_o \cdot \gamma \cdot H \cdot J,$$

где τ_d , τ_o – касательное напряжение на дне и откосе канала, кгс/м² (Па).

В. Т. Чоу [5] приводит графики $k_d = f(b/H)$ и $k_o = f(b/H)$ (где b – ширина по дну, м) для трапециoidalного сечения канала с различным заложением откосов и прямоугольного сечения. Также даются графики значения удельной влекущей силы для каналов, проложенных в связанных грунтах, в зависимости от рода грунта, для каналов в несвязанных грунтах значения допустимой удельной влекущей силы даются в зависимости от среднего диаметра частиц.

Расчет для связанных грунтов заключается в выборе примерного сечения канала, затем задаются допустимыми значениями τ_d , J , b/H , n . Из формулы (1), предварительно найдя из графика τ_d , определяют высоту (H) и по формуле Шези расход. Варьируя значением b/H , подбором находят такое соотношение, которое отвечает заданному расходу.

В случае несвязанных грунтов коэффициент влекущей силы (k_o) для откоса задается из условия устойчивости на сдвиг частиц грунта на откосе в виде:

$$k_o = \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \alpha}{\sin^2 \varphi}},$$

где α – угол наклона откоса (угол наклона касательной к линии откоса);

φ – угол естественного откоса грунта.

Форма гидравлически устойчивого сечения описывается косинусоидой:

$$h = H \cdot \cos \alpha \cdot \left(\frac{\operatorname{tg} \varphi}{H} \cdot x \right), \quad (2)$$

где x – расстояние от уреза воды, м.

Порядок расчета следующий. При заданных значениях Q , J , τ_d , φ , n из формулы (1) находят глубину (H). Затем по формуле (2) строят сечение и находят площадь (ω):

$$\omega = \frac{2,04 \cdot H^2}{\operatorname{tg} \varphi}.$$

Из формулы Шези находят расход. Если найденный расход не равен расчетному,

варьируя размером вставки по дну в средней части живого сечения, добиваются равенства расчетного расхода заданному.

В случае связанных грунтов методу влекущей силы присущи недостатки метода допустимых скоростей, т. е. не учитывается транспорт русловых наносов, нет четкой зависимости коэффициента шероховатости от параметра формы русла b/H и, кроме того, сложно назначить допустимое касательное напряжение, так как на размываемость этих грунтов влияют диффузионное выщелачивание, набухание, размокание, степень агрегатирования и др. [6].

В случае несвязанных грунтов не учитывается влияние взвешенных наносов и, как отмечалось при рассмотрении методики допустимых скоростей, определение гидравлических потерь по формуле Шези для крупных каналов ненадежно.

Следующий метод – использование морфологических зависимостей для назначения параметров канала. Морфологические зависимости в основном получены на основе результатов обработки данных натурных исследований на конкретных реках, каналах (В. Г. Глушков, С. И. Рыбкин, М. А. Великанов, С. Т. Алтунин, В. С. Лапшенков и др.). Поэтому они справедливы лишь для этих конкретных условий. Использование их в расчетных схемах для других условий требует корректировки коэффициентов и показателей степеней, что ограничивает их применение. Попытка перенести эти структурные связи (морфологические зависимости) на большой канал в связанных грунтах (например, В. С. Алтунин, М. М. Селяметов, Е. К. Рабкова, В. И. Антроповский [7]) не подтверждена надежно натурными наблюдениями. Так, М. М. Селяметов [8] на основе формул С. Т. Алтунина для B и h_{cp} в аллювиальных руслах и формулы Ц. Е. Мирцхулавы для неразмывающей скорости в связанных грунтах [9] предложил следующие морфологические зависимости:

$$B = f_1(Q, d, c, \rho_{гр}, m, n, k), \quad (3)$$

$$h_{cp} = f_2(Q, d, c, \rho_{гр}, m, n, k), \quad (4)$$

$$h_{max} = f(Q, d, c, \rho_{гр}, m, n, k), \quad (5)$$

где B – ширина канала по урезу воды, м;

Q – расход канала, м³/с;

d – размер отрывающихся отдельностей, мм;

c – сцепление грунта, кгс/м² (Па);

$\rho_{гр}$ – плотность грунта, кг/м³;

m, n, k – коэффициенты условий работы, перегрузки, однородности.

Форму поперечного сечения предлагается описывать параболой:

$$y = 0,012 \cdot x^2,$$

где x – расстояние от края откоса, м;

y – глубина, м.

Для подтверждения приводятся натурные морфологические данные по каналам Куйбышевскому и Волга – Урал.

Недостатки эмпирических формул (3)–(5) те же, что и формулы в режимной теории.

К смешанным методам можно отнести метод С. Т. Алтунина для несвязанных грунтов, который предлагает использовать одновременно метод морфологических зависимостей и метод допустимых касательных напряжений (влекущей силы). Этому методу присущи недостатки методов влекущей силы и морфологических зависимостей.

Решение Ю. М. Кузьмина [10] относится к «универсальным», т. е. в нем рассматриваются вопросы проектирования каналов как в несвязанных, так и в связанных грунтах. Автором получены уравнения профилей предельно устойчивых откосов, зависимости для основных гидравлических параметров канала в условиях транспорта нано-

сов и при отсутствии такового. При этом гидравлические сопротивления определяются по формуле Шези, а опытный материал получен на каналах с гидравлическим радиусом $R < 3$ м, что не позволяет распространять этот метод на большие каналы.

Проведенный анализ показывает, что в настоящее время среди многообразия методов расчета крупных каналов не существует достаточно хорошо обоснованной методики расчета каналов в связанных и несвязанных грунтах. Рассмотрение существующих методик позволяет увидеть, какими путями не следует идти в решении задач, связанных с расчетом крупного мелиоративного канала. Так, разработка «универсальной» методики расчета устойчивости поперечного сечения канала, пригодной для связанных и несвязных грунтов, является нецелесообразной вследствие разной сопротивляемости этих грунтов размыву на откосе. Условия устойчивости откосов из несвязанных грунтов существенным образом отличаются от условий устойчивости откосов из связанных грунтов. Устойчивость частиц несвязанного грунта на откосе определяется составляющей гравитационных, а также гидродинамических сил. Устойчивость откоса из связанного грунта при условии обеспечения устойчивости грунта размыву на дне канала определяется общим равновесием земляных масс в условиях насыщения водой и не зависит от гидродинамических сил, прилагаемых к поверхности откоса потоком (они всегда меньше, чем на дне канала).

Необходимо отметить, что оценка гидродинамических сопротивлений по формуле Шези зашла в тупик. Как отмечает Г. П. Скребков [3], главная причина сложившегося неудовлетворительного положения в области теории сопротивления открытых потоков заключается в том, что в расчетных формулах используется гидравлический радиус, который не является универсальным параметром. Применение гидравлического радиуса правомерно тогда, когда трение потока одинаково во всех точках смоченного периметра, что возможно только в круглых трубах и плоских каналах.

Учитывая изложенное выше, можно наметить следующие пути решения задач. Необходимо осуществить переход от средних характеристик потока, таких как средняя скорость, среднее касательное напряжение, средняя относительная шероховатость, гидравлический радиус и т. д., к локальным характеристикам: местному касательному напряжению, местным скоростям и местным коэффициентам гидравлического трения. Теоретическое описание скоростных профилей по живому сечению можно вести с привлечением полуэмпирических теорий турбулентности с использованием успехов в развитии теории турбулентного пограничного слоя. Вопрос о гидравлическом сопротивлении целесообразно решать путем «гидравлического конструирования» живого сечения канала по отдельным вертикалям.

Вопрос о взвешивании и переносе наносов целесообразно решать на энергетическом уровне, поскольку знание структуры скоростного поля позволит составить баланс мощности для частного случая – равномерного движения. В такой постановке вопросы гидравлических сопротивлений и транспорта наносов взаимно увязываются.

Решим задачу для несвязанного грунта, вода осветленная, дно горизонтальное, откосы канала криволинейные (полигональные), $b/H_0 \geq 3...5$ (рисунки 1).

Для описания скоростной структуры на вертикали воспользуемся логарифмическим законом распределения, базирующимся на полуэмпирической теории турбулентности Прандтля – Кармана:

$$\frac{V}{V_*} = \frac{1}{\kappa} \ln y + c, \quad (6)$$

где V – скорость в точке потока на расстоянии y от стенки, м/с;

V_* – динамическая скорость, м/с:

$$V_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}},$$

где τ – касательное напряжение на стенке;

ρ – плотность жидкости, кг/м³.

k – постоянная Кармана;

c – постоянная интегрирования.

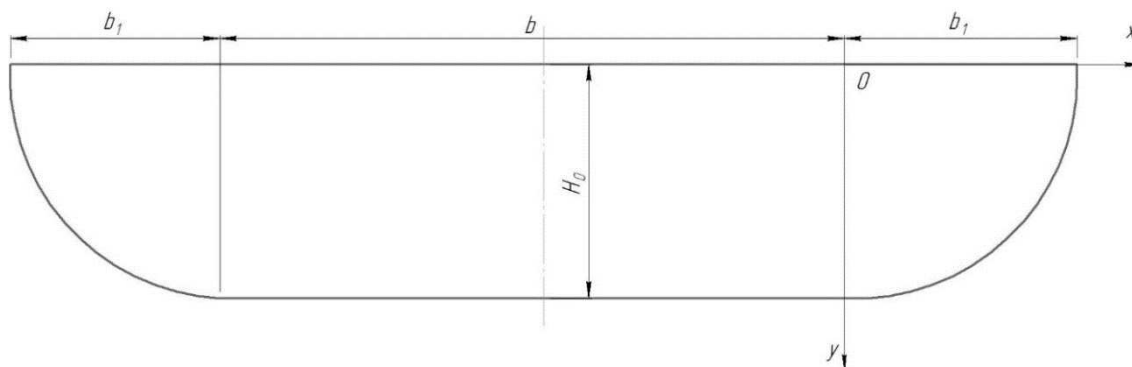


Рисунок 1 – Схема к расчету крупного мелиоративного канала

Подставляя постоянные в формулу (6) и переходя к десятичным логарифмам, получим уравнение для скорости на вертикали:

$$V = V_* \cdot 5,75 \cdot \lg \frac{y \cdot V_*}{\nu} + 5,5 \cdot V_* \quad (7)$$

Интегрируя уравнение (7) по глубине, найдем удельный расход на вертикали, м²/с, на один погонный метр:

$$q = 5,75 \cdot V_* \int_0^H \lg \frac{V_*}{\nu} dy + 5,75 \cdot V_* \int_0^H \lg y dy + 5,5 \cdot V_* \int_0^H dy = 5,75 \cdot V_* \cdot H \cdot \lg \frac{H \cdot V_*}{\nu} + 3 \cdot V_* \cdot H. \quad (8)$$

Вначале по уравнению (1) определяем допустимую глубину при заданном уклоне:

$$H_{0 \text{ доп.}} = \frac{\tau_{\text{доп.}}}{\gamma \cdot J}, \quad \tau_{\text{доп.}} = V_{* \text{ доп.}}^2 \cdot \rho.$$

Допустимую динамическую скорость можно определить, размывая образец ненарушенной структуры с трассы канала в лабораторном лотке, или по формуле Ц. Е. Мирцхулавы, увязав скорость на высоте выступов шероховатости с динамической скоростью.

Затем определяем расход, проходящий на откосе. Форма откоса описывается уравнением (2), а расход на откосе с учетом коэффициента влекущей силы равен:

$$Q_{\text{отк.}} = \int_0^{b_1} q_x dx,$$

$$q_x = k_x \cdot q; \quad k_x = \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \alpha}{\sin^2 \varphi}}.$$

Расход, проходящий по центральной части канала, равен:

$$Q_0 = Q - 2 \cdot Q_{\text{отк.}}$$

Расход канала (Q) задан.

Определяем ширину центральной части канала (ширину по дну). Подставляя в уравнение (8) допустимую динамическую скорость, определяем допустимый удельный расход и находим ширину канала по дну:

$$b = \frac{Q_0}{q_{\text{доп.}}}$$

Расчет канала в связанных грунтах проводится аналогично, но, как отмечалось

выше, устойчивость откоса из связанного грунта при условии обеспечения устойчивости грунта размыву на дне канала определяется общим равновесием земляных масс в условиях насыщения водой и не зависит от гидродинамических сил, прилагаемых к поверхности откоса потоком (они всегда меньше, чем на дне канала). Поэтому при расчете расхода на откосе мы не учитываем коэффициент влекущей силы.

Предложенный метод расчета позволяет проектировать канал с учетом изменения физико-механических свойств грунтов не только по трассе канала, но и по его периметру. При заданных уклонах J , φ , $\tau_{\text{доп}}$ рассчитанная форма сечения является единственно возможной формой устойчивого (неразмываемого) русла «статического равновесия».

Список использованных источников

1 Руководство по проектированию магистральных и межхозяйственных каналов оросительных систем: утв. Гл. техн. упр. Минводхоза СССР 18.11.74. – М.: Минмелиоводхоз СССР, 1975. – 51 с.

2 Скребков, Г. П. Метод эпюр скоростей и его приложение к расчету земляных каналов / Г. П. Скребков // Промышленная теплотехника и гидравлика. – Чебоксары: Чуваш. ун-т им. И. Ульянова, 1976. – Вып. 2. – С. 28–36.

3 Скребков, Г. П. Гидравлический расчет устойчивых земляных каналов по методу эпюр скоростей / Г. П. Скребков // Гидротехническое строительство. – М.: Энергия, 1976. – № 10. – С. 25–27.

4 Коротков, В. Е. К выводу обобщенной формулы неразмывающей скорости для несвязанных грунтов / В. Е. Коротков // Гидротехническое строительство. – М.: Энергия, 1976. – № 10. – С. 27–28.

5 Чоу, В. Т. Гидравлика открытых каналов / В. Т. Чоу. – М.: Госстройиздат, 1969. – 464 с.

6 Алтунин, В. С. Мелиоративные каналы в земляных руслах / В. С. Алтунин. – М.: Колос, 1979. – 255 с.

7 Антроповский, В. И. Определение параметров больших земляных каналов на основе гидролого-морфологической аналогии / В. И. Антроповский // Гидротехническое строительство. – 1981. – № 10. – 37–40.

8 Селяметов, М. М. Кинематико-морфологические зависимости для расчета каналов в связанных грунтах / М. М. Селяметов // Доклады ВАСХНИЛ. – М., 1977. – № 3. – С. 42–44.

9 Мирцхулава, Ц. Е. Размыв русел и методика оценки их устойчивости / Ц. Е. Мирцхулава. – М.: Колос, 1967. – 179 с.

10 Кузьминов, Ю. М. Мелиоративные каналы в легкоразмываемых грунтах / Ю. М. Кузьминов. – М.: Колос, 1977. – 192 с.

УДК 631.432.3

А. Н. Салугин

Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения, Волгоград, Российская Федерация

ДИНАМИКА ПЕРЕХВАТА ДОЖДЕВЫХ ОСАДКОВ РАСТИТЕЛЬНОСТЬЮ И ДЕПРЕССИЯМИ

В статье рассматриваются динамические аспекты процессов, протекающих во времени при выпадении осадков на элементарном водосборе. Основой исследования является аналитическое моделирование. Выпадение осадков, задержание растительностью, накопление в углублениях на склоне и склоновый поток к тальвегу рассматриваются в контексте системной динамики. Разработка аналитических моделей явля-