

ГИДРАВЛИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ УСТАНОВЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ШЕРОХОВАТОСТИ В МЕЛИОРАТИВНОЙ ПРАКТИКЕ

Авлакулов М.

Авлакулов Мейли - д.т.н., профессор. Каршинский инженерно-экономический институт.
г. Карши, Узбекистан, e-mail: mavlakulov@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-8154-1153>

Аннотация: В статье рассматриваются вопросы моделирования динамики поверхностных вод в моделях мелкой воды. При поливе сельскохозяйственных культур по бороздам в процессе движения мелкой воды по поливной борозде в зависимости от формы дна борозды происходит размыв или заиление. На лизиметрическом комплексе исследовался характер движения мелкой воды, и на основании его изучения составлена гидравлическая модель по влиянию гидравлических сопротивлений в виде шероховатости дна борозды. При составлении модели были использованы классические методы Маннинга, Павловского и Дарси–Вейсбаха.

Ключевые слова: поливная борозда, гидравлическая модель, коэффициент шероховатости, лизиметрический комплекс, поверхностные воды, грунтовые воды, размыв, заиление.

Abstract: The article deals with the modeling of surface water dynamics in shallow water models. When irrigating crops along furrows, in the process of movement of shallow water along the irrigation furrow, erosion or silting occurs, depending on the shape of the bottom of the furrow. On the lysimetric complex, the nature of the movement of shallow water was studied, and on the basis of studying them, a hydraulic model was compiled according to the influence of hydraulic resistance in the form of the roughness of the bottom of the furrow. When compiling the model, the classical methods of Manning, Pavlovsky and Darcy–Weisbach were used.

Keywords: irrigation furrow, hydraulic model, roughness coefficient, lysimetric complex, surface water, groundwater, erosion, silting.

Введение. Вопросы движения поливной воды по бороздам с нестационарным дном - весьма актуальны. Это связано с интересом к математическому моделированию малой воды по бороздам, вызванных изменением формы бороздочного дна из-за размыва или заиления [1]. Моделирование движений малой воды в гидродинамике требует большого времени для расчета [2, 3]. Так, в работе [3] было отмечено, что для детального моделирования явления на продолжительное время требуются модели, способные воспроизводить дисперсию и отражать неоднородность процесса в вертикальном направлении. Это было обозначено, например, в работах [1,4], где сравнительный анализ показал, что на начальной стадии процесса в случае длинного тонкого заиления все модели, от классических уравнений малой воды до полной модели течения идеальной жидкости, хорошо описывают наиболее заметные характеристики движения малой воды, отмеченные в эксперименте в лизиметрическом комплексе. Даже линейная модель мелкой воды в начальной части процесса показывает картину, достаточно близкую к экспериментальным данным, однако с развитием процесса осредненные по вертикали уравнения приводят к решениям, далеким от полученного в эксперименте. Кроме того, уравнение малой воды показывает значительное превышение амплитудных характеристик.

Цель работы. Исследование закономерности гидравлической взаимосвязи поверхностных вод, инфильтрационной влаги, изменение уровня грунтовых вод и управление за состоянием зоны увлажнения почво-грунта при различных режимах водоподачи. Разработка научных основ по применению эффективных технологий по управлению динамикой изменения зоны увлажнения при поверхностном поливе сельскохозяйственных культур.

Материалы и методы. В процессе исследований использованы методы, принятые для натуральных и полевых условий, теория неустановившейся фильтрации воды в почвогрунтах и моделирование динамики и направленности гидрологических, гидрогеологических и почвенно-мелиоративных процессов с использованием современных технических средств наблюдений и математических методов.

Результаты и обсуждение. Для моделирования динамики поверхностных вод в моделях мелкой воды необходимо учитывать гидравлическое сопротивление [7], для описания которого в мелиоративной практике используется ряд разработанных феноменологических моделей. Среди них можно выделить модель Дарси–Вейсбаха, которая изначально применялась для определения сопротивления течению жидкости в трубе, а позже была модифицирована для открытых каналов

$$U = (8g/f)^{1/2}(IR)^{1/2}, \quad (1)$$

где U — средняя скорость потока, f — коэффициент трения Дарси–Вейсбаха, R — гидравлический радиус, I — уклон канала. Наиболее распространенной является модель Шези [2, 7,8]:

$$U = C(IR)^{1/2}, \quad (2)$$

где C — коэффициент сопротивления Шези. В классической гидравлике рассмотрены зависимости для расчета коэффициента Шези. Была предложена формула

$$C = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{n} - \frac{\sqrt{g}}{0,13} (1 - \lg R) + \sqrt{\frac{1}{4} \left[\frac{1}{n} - \frac{\sqrt{g}}{0,13} (1 - \lg R) \right]^2 + \frac{\sqrt{g}}{0,13} \left(\frac{1}{n} + \sqrt{g} \lg R \right)} \right], \quad (3)$$

где n — коэффициент шероховатости. При малых гидравлических радиусах ($R < 5$) используют формулу Павловского

$$C = R^r/n, \quad (4)$$

где $r = 2,5\sqrt{n} - 0,13 - 0,75\sqrt{R}(\sqrt{n} - 0,1)$. Для частного случая при $r = 1/6$ имеем формулу Маннинга

$$U = \frac{R^{2/3} I^{1/2}}{n_M}, \quad (5)$$

где n_M — коэффициент шероховатости по Маннингу.

Другим примером является формула Альтшуля–Лудова:

$$C = \exp \left\{ \frac{1,3 \log(R) - 2,3 \log(n_M)}{1 + 0,22 \log(R)} \right\}. \quad (6)$$

В работах [5, 6, 7] рассматриваются различные варианты форм записи гидравлического сопротивления и зависимости от параметров русла. Такого рода соотношения, связывающие коэффициент сопротивления с коэффициентом шероховатости, по-видимому, подразумевают различные определения самого параметра n_M для конкретных объектов.

Коэффициент Маннинга и характеристики борозды. Метод оценки эффективного коэффициента шероховатости. Рельеф дна борозды, как правило, имеет сложную структуру и характеризуется различными морфометрическими параметрами. В гидравлических моделях сопротивления потоку, связанные с тем или иным фактором, принято учитывать через коэффициент шероховатости Маннинга [5,10]. В моделях мелкой

воды этот параметр также имеет большое значение, поскольку позволяет учитывать различные мелкомасштабные физические факторы.

На практике существует ряд проблем с определением n_M . Чаще всего значения выбираются из таблиц М.Ф. Срибно и В.Т. Чоу, но такое определение имеет большие погрешности [6,8]. Другим способом является вывод эмпирических формул для различных реальных водных объектов [6], данный подход не универсален и имеет свои недостатки. Как показывают исследования, величина n_M неоднородна по пространству и зависит от координат. Многие авторы указывают на естественные изменения величины n_M для существенно нестационарных потоков. В классической гидравлике предложена модель шероховатости в виде

$$n_M = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)m, \quad (7)$$

где n_0 - базовое значение n_M , соответствующее прямолинейному каналу с гладкими стенками, к которому добавляются дополнительные факторы: n_1 - значение для мелкомасштабных нерегулярных неоднородностей поверхности, n_2 - значение для изменений поперечного сечения канала, n_3 - значение для препятствий, n_4 - значение для растительности, m — коэффициент для меандрированного русла, который является отношением длины извилистого канала к длине прямого. При таком подходе можно добавлять еще слагаемые n_k , учитывающие другие факторы - турбулентность течения, потери энергии из-за переноса примесей и движения наносов [1,9], нестационарность потока, крупномасштабные особенности и другие. Таким образом, n_M является интегральной характеристикой, в рамках которой можно учесть любые физические факторы исходя из дополнительных экспериментальных данных и результатов моделирования отдельных явлений. На наш взгляд, более целесообразно использовать формулу для определения n_M в виде

$$n_M = n_0 + \sum_{i=0}^K n_i, \quad (8)$$

где n_i — добавочные значения коэффициентов шероховатости, будем называть их эффективными коэффициентами Маннинга. В данном представлении сопротивление от руслового процесса учитывается в виде добавочного слагаемого. Отметим разницу в подходах (7) и (8) с точки зрения учёта руслового процесса.

Разработанный метод оценки эффективных коэффициентов Маннинга основывается на численном эксперименте. Будем строить наборы модельных рельефов с крупномасштабными неоднородностями и проводить расчеты с коэффициентом Маннинга $n_M = 0$. Для гладкого прямолинейного канала параметр n_M будем варьировать, рассчитывая усредненные профили скорости. Шероховатости борозды оказывают влияние на среднюю скорость потока. Таким образом, сопоставляя скорости в неоднородной борозде со скоростями в гладком прямолинейном, можно связать величину n_M с параметрами неоднородности.

Течение в борозде при малых значениях коэффициента Маннинга. Прежде чем исследовать влияние различных неоднородностей рассмотрим предельный случай $n_M = 0$. В этом случае мы имеем ускоряющийся поток, что приводит к гидродинамической неустойчивости (рис.1). Возникают сильные поперечные движения с образованием вихревых структур. Вдоль потока образуется последовательность нестационарных пульсаций (см. рис.1).

С увеличением параметра $n_M > 0$ поток начинает стабилизироваться, течение приобретает ламинарный характер, поперечная компонента скорости исчезает. Наши расчеты показали, что при всех типичных значениях, характерных для реальных борозд, при

$n_M \geq 0.02$ поток устойчив. Конкретное критическое значение n_M существенно зависит от всего набора свободных параметров задачи и лежит в пределах $0.005 \div 0.02$.

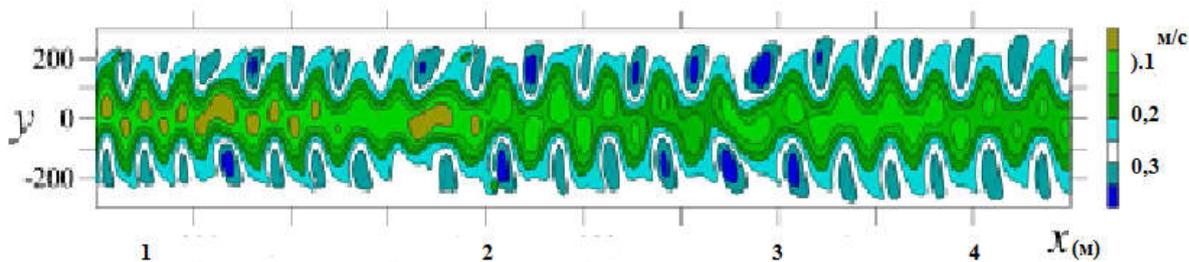


Рис.1. Пространственные распределения компонента скорости $V_x(x, y)$ (а), $V_y(x, y)$ (б) и глубины $H(x, y)$ (в) для фрагмента канала $1\text{ м} \leq x \leq 4\text{ м}$

Для построенного набора моделей возмущенного рельефа с различными значениями ℓ , Δb_{\max} , n_M было проведено достаточно вычислительных экспериментов. Результаты моделирования позволили установить связь между параметрами возмущений дна и коэффициентом Маннинга. С увеличением шероховатости n_M для гладкой борозды $b_0(x, y)$ уменьшаются максимальные значения продольных профилей скорости $U_x^{(av)}(y)$. Таким образом, для возмущений дна почти всегда можно подобрать соответствующее значение коэффициента Маннинга (рис.2). Увеличение максимальной амплитуды неоднородности дна Δb_{\max} приводит к монотонному росту соответствующего значения n_M . Поток воды движется медленнее с увеличением параметра Δb_{\max} . Более сложный вид имеет зависимость максимальной скорости потока $U_x^{(av)}$ от пространственного масштаба ℓ (рис.2). Мелкомасштабные неоднородности дна со шкалой примерно $\ell < 50\text{ м}$ оказывают наиболее сильный тормозящий эффект на поток воды. Для диапазона параметров $\ell = 50 \div 350\text{ м}$ и $\Delta b_{\max} = 0.2 \div 0.8\text{ м}$ значения коэффициента Маннинга не превышают 0,02.

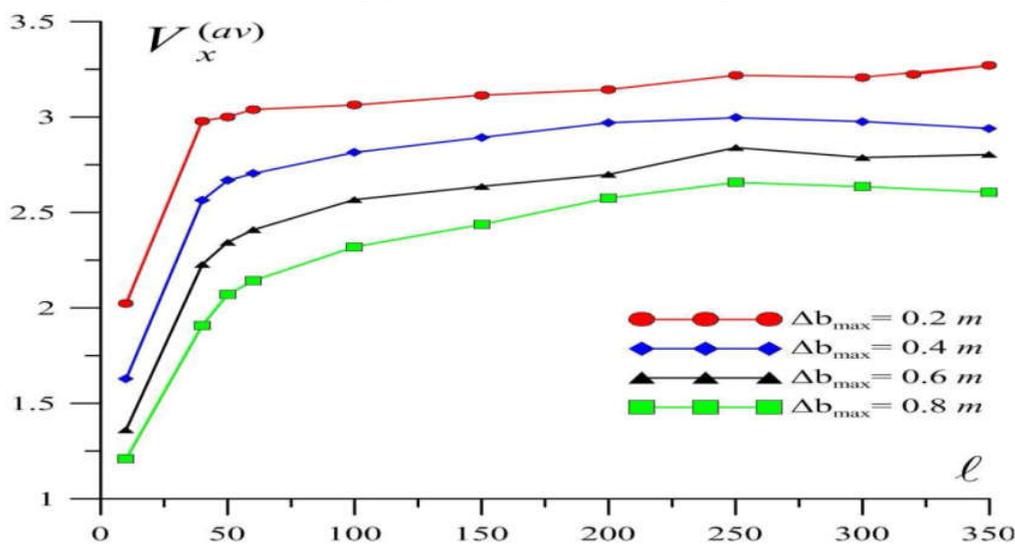


Рис.2. Зависимость максимальной скорости потока на линии $\Delta b_{\max}(y) = 0$ (м/с) от пространственного масштаба возмущения ℓ (м)

Выводы. В настоящей работе на основе единого подхода получены определяющие неустановившегося уравнения малой воды по борозде с нестационарным дном для случая деформирующегося или подвижного дна. Для вывода уравнений предполагалось, что вертикальная компонента скорости течения является линейной функцией от координаты z , а компоненты скорости в горизонтальной плоскости от z не зависят вовсе. Компоненты скорости в горизонтальной плоскости считаются квадратичными функциями от z , а также предполагается потенциальность течения и разномасштабность процессов по вертикали и в

горизонтальной плоскости, что выражается во введении параметра $\beta=(h_0/L)^2$ и не учёте в уравнениях членов порядка $O(\beta^2)$. Следует отметить, что форма записи системы уравнений может иметь важное значение при конструировании эффективных численных алгоритмов. Представляется, что выведенная нами модель уравнения движения в форме (10) более удобно при численной реализации, она не содержит вторых производных по времени от искомой функции η .

Разумеется, окончательно оценить достоинства и недостатки рассмотренных моделей и известных вычислительных алгоритмов для них можно будет лишь после всестороннего сравнения результатов расчетов широкого круга задач неустановившегося движения малой воды по бороздам с нестационарным дном. Сейчас такая оценка невозможна, так как имеются лишь отдельные расчеты с использованием этих моделей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Елецкий С.В., Майоров Ю.Б., Максимов В.В. и др. Моделирование генерации поверхностных волн перемещением фрагмента дна по береговому склону // Тр. Междунар. конф. "Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании". Вестн. КазНУ им. Аль-Фараби. Сер. "Математика, механика, информатика". 2004. №3(42). Ч. 2. С. 194-206.
2. Афанасьев К.Е., Афанасьева М.М., Терентьев А.Г. Исследование эволюции свободных границ при нестационарном движении тел в идеальной несжимаемой жидкости методами конечных и граничных элементов // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1986. № 5. С. 8-13.
3. Хажоян М.Г. Численное моделирование поверхностных волн над подвижным дном // Вычисл. технологии. 2007. Т. 12, № 4. С. 96-105.
4. Shokin Yu.I., Fedotova Z.I., Khakimzyanov G.S. et al. Modelling surfaces waves generated by a moving landslide with allowance for vertical flow structure // Rus. J. Numer. Anal. Math. Modelling. 2007. Vol. 22, N 1. P. 63-85.
5. Lynett P.J., Liu P.L.-F. A numerical study of submarine-landslide-generated waves and run-up//Proc. Royal Society of London. A. 2002. Vol. 458. P. 2885-2910.
6. Lynett P.J., Liu P.L.-F. A two-layer approach to water wave modeling // Proc. Royal Society of London. A. 2004. Vol. 460. P. 2637-2669.
7. Численное моделирование течений жидкости с поверхностными волнами / Г.С. Хахимзянов, Ю.И. Шокин, В.Б. Барахнин, Н.Ю. Шокина. Новосибирск: Изд-воСОРАН, 2001. 394 с.
8. Авлакулов М., Дониёров Т. О. Решение задачи о течении фильтрационного потока в гетерогенной среде при бороздковом поливе хлопчатника //Актуальные проблемы современной науки. – 2020. – №. 2. – С. 100-104.
9. Авлакулов М., Кодиров И. Использование лизиметров в целях установления водно-солевого режима почв для условий Кашкадарьинской области //Актуальная наука. – 2017. – №. 1. – С. 21-24.
10. Муродов Н. К., Авлакулов М. Анализ теплового режима почвы при орошении сельскохозяйственных культур методом субиригации //Новый университет. Серия: Технические науки. – 2016. – №. 1. – С. 12-16.
11. Авлакулов, М. and Хазратов, А.Н., 2017. Закономерности динамики процессов влаги-соли переноса в почво-грунтах. Инновационное развитие, (5), pp.9-10.