

УДК 502/504:627.15:551.482.5

М. А. ВОЛЫНОВ

Государственное научное учреждение

Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации имени А. Н. Костякова

**ПРОЦЕСС РАЗВИТИЯ ГРЯДОВЫХ ФОРМ
НА ПОВОРОТЕ РЕЧНОГО РУСЛА**

Изложены результаты экспериментальных исследований параметров грядовых форм на излучине речного русла. Опыты проводились в кольцевом канале с песком среднего диаметра 1 мм при различных глубинах и скоростях потока в диапазонах $Re = 2,5 \cdot 10^3 \dots 1,2 \cdot 10^5$ и $Fr = 0,006 \dots 1,213$.

Установлен характер изменения высоты и длины гряд и скорости перемещения в процессе их развития.

Русловой процесс, гряды, рифели, длина и высота гряд, скорость перемещения гряд.

There are stated results of experimental researches of the seabed forms parameters on the river channel bend. The experiments were carried out in the annular channel with the sand of medium diameter 1 mm under different depths and speeds of flow in the range $Re = 2,5 \cdot 10^3 \dots 1,2 \cdot 10^5$ and $Fr = 0,006 \dots 1,213$.

The character of the change of the seabed height and length and speed of movement in the process of their development was established.

Channel process, seabed, ripples, seabed length and height, speed of seabed movement.

Для разработки и осуществления мелиоративных мероприятий по обустройству и выправлению речных русел, регулированию руслового процесса и речного стока, реализации различных гидротехнических и гидроэкологических проектов на водотоках требуются детальные данные о параметрах русловых форм, факторах, определяющих их развитие и влияющих на процессы переформирования.

Русловые формы определяют гидравлическое сопротивление русла, его пропускную способность и существенно образом влияют на режим уровней и скоростей речного потока. Русловые формы делятся на два класса – микроформы и мезоформы. Согласно Н. С. Знаменской, под микроформами, к которым относятся рифели и гряды, понимаются такие образования в русле, которые определяют его гидравлическое сопротивление [1, 2]. Крутизна рифелей, т. е. отношение их высоты h_r к длине L_r , колеблется в пределах от 0,05...0,15. Длина рифелей значительно меньше глубины потока, и для натуральных потоков, по данным Д. Кеннеди, в среднем близка к 30 см [3].

К. В. Гришанин, рассматривая гряды и рифели как разные классы русловых форм, считал, что гряды имеют длину порядка десятков глубин потока, а длина рифелей имеет порядок глубины потока [4].

Русловые формы, такие как гряды, развиваются в течение длительного времени и постепенно стабилизируются. Параметры стабилизированных гряд в прямолинейных руслах изучались в натуральных и лабораторных условиях. Значительно меньшее число работ посвящено изучению русловых форм на повороте потока в речных излучинах [5].

Имеющиеся данные показывают, что зависимости, характеризующие параметры стабилизированных русловых форм на повороте русла, качественно близки к зависимостям, полученным для прямолинейных русел, и обнаруживают отчетливую зависимость от числа Фруда [5]. Вместе с тем, процесс развития русловых форм на повороте потока во времени пока не изучен. Известен лишь общий характер русловых деформаций в речных излучинах, определяемый особенностями течения на повороте потока вследствие возникновения циркуляционного течения [6].

Период формирования русловых форм T_c определяется как время, необходимое для приспособления потока и русла друг к другу при их взаимном влиянии. Это обстоятельство определяет необходимость проведения исследований продолжительности процесса формирования и параметров русловых форм в процессе их развития.

Длительность формирования русло-

вых образований зависит от того, насколько быстро «обновляется» собственный объем русловой формы. Период такого обновления (время «жизни» руслового образования T_r) может рассматриваться как некоторый единичный масштаб времени в процессе переформирования русловых образований. Его можно определить, принимая во внимание продольный размер русловых стабилизированных образований L_{rc} и скорость их перемещения C_r :

$$T_r = \frac{L_{rc}}{C_r}. \quad (1)$$

Для водного потока с глубиной H и средней скоростью v следует также ввести характерный масштаб времени T_{II} в следующем виде:

$$T_{II} = \frac{H}{v}. \quad (2)$$

Сопоставим (1) и (2):

$$\frac{T_r}{T_{II}} = \frac{L_{rc}}{H} : \frac{v}{C_r}. \quad (3)$$

Используя соотношения, полученные ранее автором для стабилизированных гряд [5], получим:

$$\frac{L_{rc}}{H} = 7 + 5,51g Fr; \quad \frac{C_r}{u_{др}} = 0,01Fr, \quad (4)$$

где $u_{др}$ – скорость потока у дна в месте образования русловых форм.

Измерение распределения скоростей в кольцевом канале показало, что оно равномерно по глубине потока, т. е. без большой погрешности можно принять $u_{др} = v$ [5].

С учетом зависимостей (4) и (5) комплекс (3) запишем так:

$$\frac{T_{rc}}{T_{II}} = \frac{7 + 5,51g Fr}{0,01Fr}. \quad (5)$$

Результаты расчета по (5) показывают, что период «жизни» стабилизированных гряд T_r более чем на три порядка превышает характерный масштаб времени T_{II} , уменьшаясь примерно вдвое с ростом числа Фруда в диапазоне $Fr = 0,01...1,2$ (рис. 1). В указанном диапазоне формула (5) удовлетворительно аппроксимируется следующей зависимостью:

$$\frac{T_{rc}}{T_{II}} = 10^3 \frac{0,75}{\sqrt{Fr}}. \quad (6)$$

За время T_{rc} русловое образование перемещается полностью в новое положение, при этом весь его объем «перерабатывается» потоком,

постольку время собственной «жизни» русловых форм близко ко времени их стабилизации.

Для проведения исследований по развитию и стабилизации русловых форм во времени на прямолинейных участках потока требуются большой длины лабораторные стенды. Для исследования процесса развития русловых форм на повороте потока наилучшим образом подходит кольцевой канал, в котором время взаимодействия потока с русловыми формами может быть как угодно большим.

Экспериментальные исследования образования и развития во времени русловых форм в кольцевом канале производились на песке крупностью 1 мм при различных глубинах и скоростях потока в диапазоне чисел Рейнольдса ($Re = 4VN/v$) $2,56 \cdot 10^3 ... 1,22 \cdot 10^5$ и числах Фруда ($Fr = v^2/(gH)$) от 0,0064 до 1,213. Отношение радиуса поворота канала $R = 55,5$ см к его ширине $B = 20$ см равнялось 2,75, что близко к параметрам поворота естественных речных русел.

Параметры развивающихся в канале русловых форм измеряли, формы гряд в различные моменты времени их развития фотографировали. Скорости в канале создавались вращающимся кольцевым активатором и микровертушкой с диаметром лопастей 20 мм, ориентированной тангенциально к вектору орбитальной скорости.

Измерения с помощью индикаторов направления течения показали, что жидкость в кольцевом канале движется сложным путем. Кроме основного орбитального движения происходит винтообразное циркуляционное движение, которое в верхней части потока направлено в сторону вогнутой стенки, а вблизи дна – к выпуклой стенке канала. Аналогичное движение потока устанавливается в излучинах речных русел [8].

Наблюдения показали, что в зависимости от скорости потока в канале возникают два различающихся типа русловых форм – малые гряды и гряды крупные. Малым грядкам свойственна правильная синусоидальная форма (рис.1).



Рис. 1. Синусоидальная форма малых гряд в кольцевом канале

Малые гряды возникают при небольших скоростях течения: $u_{др} \approx v = 20...40$ см/с вблизи малых неровностей. Малые гряды вначале появляются у вогнутой стенки канала или на небольшом расстоянии от нее (1...3 см). Они имеют продолговатую форму и ориентированы по направлению движения частиц песка, которые двигаются по криволинейным траекториям от внешней вогнутой стенки к выпуклой стенке канала.

В образовавшемся углублении возникает вихрь с осью вращения AC, размывающий углубление и создающий после него насыпь, ориентированную к центру канала (рис. 2).

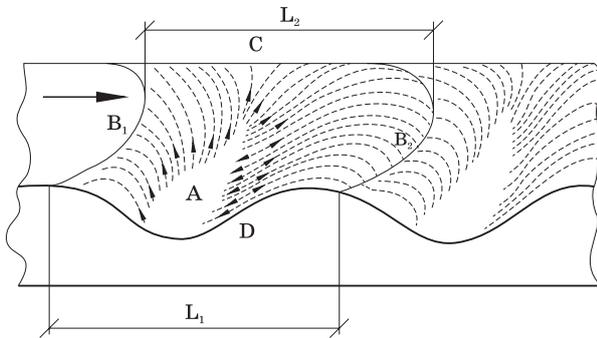


Рис. 2. Схема процесса развития малых гряд

Высота и длина гряд вблизи вогнутой стенки канала несколько меньше высоты и длины гряд у оси канала, однако с течением времени они выравниваются. Высота и длина гряд увеличиваются в основном за счет углубления их подвала. В части гряды, расположенной выше точки D, песок передвигается из углубления к вершине B_2 потоком, огибающим область A, и падает на склон гряды (см. рис.2).

Опыты показали, что при наличии какой-либо местной неровности на дне гряда образуется прежде всего вблизи этой неровности. Ниже образовавшейся гряды возникает вихрь, который размывает новое углубление и образует новую гряду. Таким образом, процесс возникновения гряд в данном режиме носит последовательный характер.

С течением времени наступает момент стабилизации гряд, когда их высота h_r и длина L_r практически не изменяются. Время стабилизации гряд по высоте T_c^h и по длине T_c^L не всегда совпадает, причем

всегда T_c^L несколько больше, чем T_c^h .

При скорости течения $u_{др} > 40$ см/с образуются крупные гряды, причем процесс их образования отличается от описанного выше. Первоначально сплошной поток песка движется вблизи внешней стенки канала под некоторым углом к радиусу и в короткий отрезок времени намывает вблизи оси канала сплошной вал высотой до 0,1 Н. В дальнейшем вал увеличивается до высоты 0,15...0,2 Н и начинает распадаться на отдельные гряды. Первоначально деление заметно лишь на вершине вала, далее процесс разделения распространяется по глубине и ширине вала. Таким образом, формируются гряды, показанные на рис. 3.

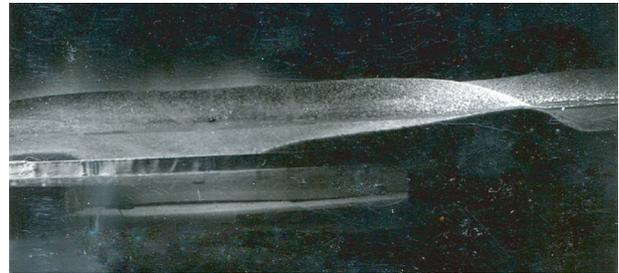


Рис. 3. Схема процесса образования крупных гряд

Профиль крупных гряд заметно отличается от профиля малых гряд и имеет отчетливо выраженную ступенчатую форму. В зависимости от скорости потока гряды развиваются либо на 2/3, либо на всю ширину канала.

На рисунках 4, 5 приведены данные экспериментальных измерений длины и высоты гряд во времени от ровного песчаного дна вплоть до полной стабилизации. Как видно из графиков, данные экспериментов на кольцевом канале достаточно хорошо согласуются с данными Н. А. Михайловой [6], полученными на линейном стенде, и качественно согласуются с результатами исследований Фуджико Исейя, выполненными на линейном канале протяженностью 160 м [7]. Несмотря на асимптотический характер взаимного приспособления потока и образующихся гряд, приемлемой как для высоты, так и для длины гряд оказалась следующая приближенная аппроксимация:

$$\frac{h_r}{h_{rc}} = \frac{L_r}{L_{rc}} = \sqrt{\frac{t}{T_c}} \quad (7)$$

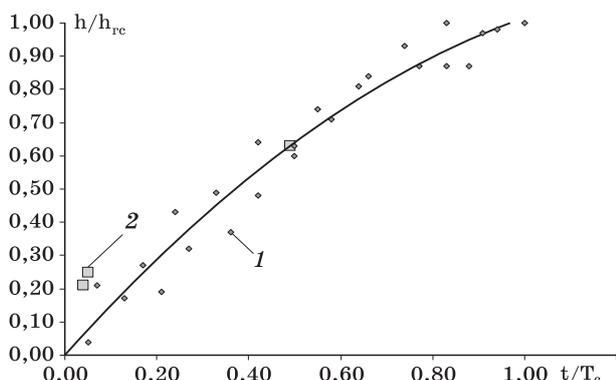


Рис. 4. Изменение высоты гряд в процессе их развития: 1 – данные эксперимента; 2 – данные Н. А. Михайловой

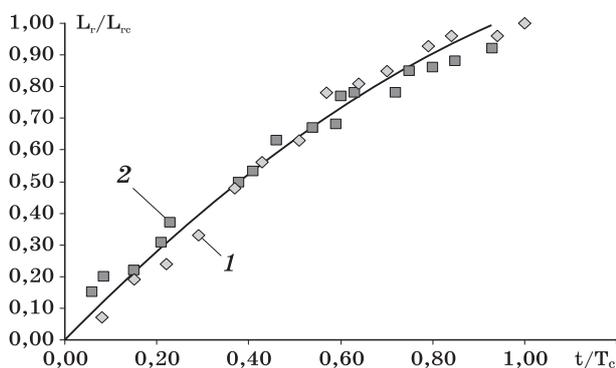


Рис. 5. Изменение длины гряд в процессе их развития: 1 – данные эксперимента; 2 – данные Н. А. Михайловой

На основании полученных данных и соотношения (7) можно считать, что крутизна гряд в процессе их развития сохраняется неизменной.

Скорость движения гряд определяется по перемещению характерных точек за рассматриваемый промежуток времени. Анализ данных показал, что скорость перемещения изменяется во времени: в начале периода образования гряд она значительна, затем постепенно уменьшается, асимптотически приближаясь к скорости стабилизированных гряд (рис. 6).

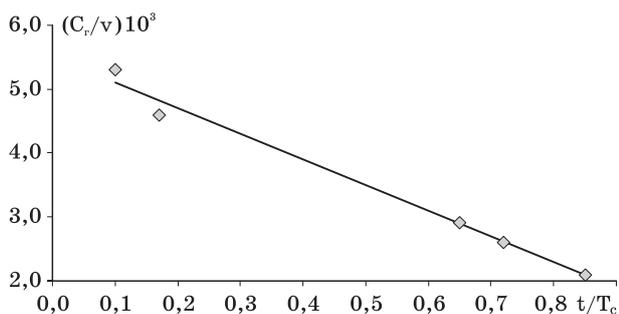


Рис. 6. Изменение скорости перемещения гряд во времени

Это связано с меньшими объемами тела гряды в начальный период и существенно меньшим временем, необходимым потоку для «переработки» и обновления тела гряды в процессе ее перемещения.

Экспериментальные данные по изучению периода стабилизации гряд в обобщенном виде представлены на рис. 7. Видно, что при умеренных числах Фруда период стабилизации T_c русловых форм близок к периоду обновления их собственного объема T_{II} . При этом произведение скорости перемещения стабилизированных гряд C_{rc} на период стабилизации T_c дает для условий экспериментов значения, весьма близкие к длинам гряд L_{rc} .

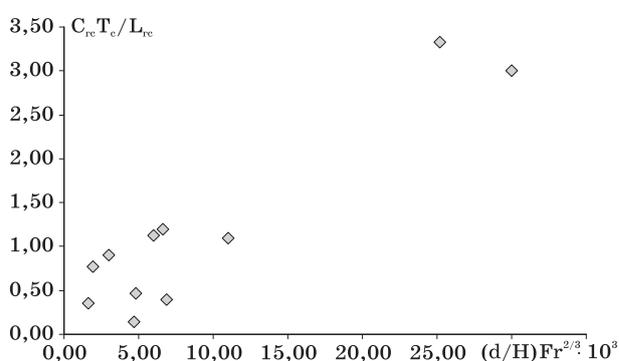


Рис. 7. Зависимость периода стабилизации гряд T_c от параметров потока и русла

Это согласуется с ранее сделанным предположением о том, что при умеренных числах Фруда период стабилизации гряд и период обновления их собственного объема являются достаточно близкими величинами. Результаты экспериментов показали, что период стабилизации гряд зависит от многих факторов: скорости движения гряд C_{rc} , длины гряд L_{rc} , а также от числа Фруда и относительной шероховатости канала. Заметный разброс точек на графике связан с трудностями точного экспериментального определения периода стабилизации T_c .

Как видно из приведенных зависимостей, для расчета параметров гряд h_r и L_r в процессе их развития необходимо знать параметры гряд h_{rc} и L_{rc} в условиях стабилизации, а также время стабилизации T_c . Расчет значений h_{rc} и L_{rc} можно выполнить по зависимостям, приведенным в статье [5], посвященной стабилизированным грядкам.

Выводы

Получены новые данные экспериментальных исследований по развитию русловых форм в кольцевом канале.

Установлен характер изменения высоты и длины образующихся гряд в процессе их развития.

Определена скорость перемещения гряд и степень ее снижения по мере развития гряд.

Предложены аналитические зависимости, характеризующие исследованные процессы.

1. Знаменская Н. С. Донные наносы и русловые процессы. – Л.: Гидрометеиздат, 1976. – 192 с.

2. Волынов М. А. Пропускная способность саморегулирующихся речных русел // Природообустройство. – 2011. – № 5. – С. 66–71.

3. Kennedy J. F. The formation of sediment ripples, dunes and antidunes // Annual review of fluid mech. – 1969. – Vol. 1. – P. 147–168.

4. Гришанин К. В. Устойчивость русел рек и каналов. – Л.: Гидрометеиздат, 1974.

5. Волынов М. А. Внутриусловие гряды образования на речных излучинах // Научное обозрение. – 2012. – № 3. – С. 60–71.

6. Михайлова Н. А. Перенос твердых частиц турбулентными потоками воды. – Л.: Гидрометеиздат, 1966. – 232 с.

7. Fudjiko Isaya. An experimental study dune development and its effect on sediment suspension // Environm. Res. Center Univ. of Tsukuba. – 1984. – № 5.

8. Волынов М. А. О плоскости раздела радиальных осредненных скоростей в поперечном сечении речного потока на излучине: Мелиорация и окружающая среда: сб. трудов ВНИИГиМ. – М.: ВНИИГиМ, 2004. – Т. 2. – С. 99–101.

Материал поступил в редакцию 26.09.12.

Волынов Михаил Анатольевич, кандидат технических наук, доцент

Тел. 8 (499) 153-21-33

E-mail: v1532133@yandex.ru

УДК 502/504:556.16

Г. Х. ИСМАЙЛОВ, И. В. ПРОШЛЯКОВ, А. В. ПЕРМИНОВ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет природообустройства»

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ ТРАНСГРАНИЧНЫХ РЕК*

Предлагается методика построения двухуровневой модели управления водными ресурсами трансграничных рек на основе использования оптимизационных и имитационных систем. Для решения задачи распределения водных ресурсов между суверенными государствами с учетом интересов природных комплексов используется принцип декомпозиции.

Трансграничные реки, водные ресурсы, водноресурсная система, двухуровневая модель, имитационная модель, каскад водохранилищ.

There is proposed a methodology of building a two-level model of water resources management of transboundary rivers on the basis of optimization and simulation systems. For the problem decision of distribution of water resources between sovereign states in view of interests of natural complexes the principle of decomposition is used.

Transboundary rivers, water resources, water resource system, two-level model, simulation model, cascade of water reservoirs.

Процессы глобализации и образования новых государств, в том числе в результате распада СССР, заставляют

по-новому рассматривать и оценивать проблемы, связанные с использованием водных ресурсов трансграничных рек (ВРТР), текущих в естественных руслах и питающихся за счет поверхностного и

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант 12 – 05 – 00193а.