



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

DOI 10.22363/2312-8143-2019-20-1-85-95

УДК 519.714

## Влияние распределения скоростей в закругленном потоке на характер размыва береговых склонов

О.Я. Масликова\*, И.И. Грицук†, Д.Н. Ионов‡, В.К. Дебольский§

\*†‡§ Институт водных проблем РАН, Российская Федерация, 119333, Москва, ул. Губкина, 3

† Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6

‡ Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, Российская Федерация, 125319, Москва, Ленинградский проспект, 64

### История статьи:

Поступила: 12 октября 2018

Доработана: 21 января 2019

Принята: 30 января 2019

### Ключевые слова:

закругление потока;  
противотечения;  
вихри;  
эрозия почв

Одними из важнейших вопросов речной гидравлики являются движение воды и формирование русла в потоке, имеющем непрямолинейное очертание в плане. В естественных условиях для рек характерно извилистое очертание в плане. Искривление струи также имеет место при делении потока на рукава, впадении притока в реку, слиянии потоков и т.п. Поэтому изучение русловых процессов в реках невозможно без знания закономерностей течения на закруглении русла.

При проектировании гидротехнических сооружений, в том числе мостовых переходов на меандрирующих участках рек, следует знать особенности динамики русла на участках поворота потока. В зимний период такие участки могут быть заужены вследствие замерзания русла, в период оттаивания льда забиты ледовыми обломками. Сужение канала вызывает возрастание числа Рейнольдса и перераспределение эпюры скоростей на рассматриваемом участке, что вызывает изменение в характере размыва.

Характер распределения скоростей и образования вихрей исследовался в лабораторных условиях на установке, создающей закругленные потоки. Показано, что при критических числах Рейнольдса в закругленном потоке у внутреннего берега возникает вихревое противотечение. Анализировалось воздействие данного распределения скоростей на характер размыва различных склонов закругленного потока.

**Благодарности.** Работа выполнена при поддержке государственной программы № 0147-2019-0001 (регистрационный № АААА-А18-118022090056-0), а также при финансовой поддержке РФФИ, проект № 18-05-00178.

\* Старший научный сотрудник лаборатории динамики русловых потоков и ледотермики, к.т.н.

† Доцент департамента строительства, Инженерная академия; старший научный сотрудник лаборатории динамики русловых потоков и ледотермики; доцент кафедры гидравлики, к.т.н., доцент; [griksuk\\_ii@rudn.ru](mailto:griksuk_ii@rudn.ru)

‡ Младший научный сотрудник лаборатории динамики русловых потоков и ледотермики, к.т.н.

§ Заведующий лабораторией динамики русловых потоков и ледотермики, д.т.н., профессор

© Масликова О.Я., Грицук И.И., Ионов Д.Н., Дебольский В.К., 2019



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

## Введение

Преобладающее количество рек имеют непрямолинейные очертания из-за влияния турбулентности течений потока на русло. Для моделирования формирования и эволюции меандров возможны как основанные на наблюдениях [1; 2], так и физически обоснованные [3] модели эрозии берегов. Модели, основанные на наблюдениях, предполагают скорость размывания берега, пропорциональную прибрежной скорости потока. Физически основанные модели рассчитывают перенос донных отложений и скорости эрозии берегов для определения отступления береговой линии канала. При этом коэффициент эрозии в натуральных моделях является эмпирическим и не отражает геометрию размыва в некоторых местах, являющихся естественными меандрами. Такие модели могут быть эффективными для прогнозирования долгосрочного поведения извилистых рек [4—6]. Физические модели используются для прогноза скорости размывания берега в любых местах естественного извилистого канала при известных входных данных, таких как поле скоростей, геометрия берега и материал слагающего склон вещества.

Изменение геометрии меандров реки проявляется в размыве на одном склоне и дне реки и осадконакоплении на другом, что ставит под угрозу безопасность речных сооружений. В [7] была создана эмпирическая модель анализа влияния изменения флуктуаций расхода на изменения геометрии меандра реки. Эта модель была построена с учетом функций седиментации и размыва. Было показано, что процесс эрозии является доминирующим в перестроении берегов меандрирующего потока.

Начало меандрирования является результатом сложного взаимодействия между потоком, донными отложениями и береговым материалом. В [8] для моделирования зарождения и развития процессов меандрирования каналов была разработана усредненная по глубине двумерная гидродинамическая модель, демонстрирующая процесс береговой эрозии, состоящей из двух интерактивных процессов: основная эрозия и обрушение. Для случая основной эрозии в работе выведено уравнение движения частиц грунта гидродинамическими силами. Процесс обрушения воспроизводился с помощью лабораторных экспериментов для моделирования зарождения и развития несвязных извилистых каналов.

Для моделирования сложных гидравлических процессов меандров реки в [9] в качестве натурной

модели изучалась река Брантас, которая протекает на протяжении 320 км вокруг горы Келуд действующего вулкана и является идеальной для моделирования движения меандров. Результаты этого анализа позволили выявить основные закономерности течения потока на повороте. Равномерное течение в меандрах прямоугольного или произвольного сечений было рассчитано в [10], где достаточно хорошо описано спиралевидное движение струй, вызванное геометрией закругленного русла. Спиральный поток перемещает частицы взвеси к центру кривизны, в то время как поперечный уклон дает движение в противоположном направлении.

В [11] представлена и проанализирована простая математическая модель для моделирования речных извилистых процессов, которая является линейной для прогнозирования поля течения и рельефа русла реки, при этом геометрические нелинейности возникают из уравнения береговой эрозии. Модель потока и русла реки получается путем полного объединения поля потока, топографии русла и переноса отложений и учитывает (приблизительно) конвекцию импульса вторичного потока.

Статья [12] представляет расширенную двумерную (2D) численную модель водного потока и массопереноса в меандрирующих каналах. Гидродинамическая модель основана на решении усредненных по глубине уравнений непрерывности и импульса, в которых плотность потока изменяется в зависимости от концентрации переносимой массы. Основным уравнением для модели переноса массы является усредненное по глубине уравнение конвекции и диффузии. Сравнение моделируемой скорости и высоты поверхности воды с измерениями показало, что включение дисперсионных членов улучшило результаты моделирования.

Трехмерный анализ [13] определяет как подвижность частиц, так и средний угол ориентации движущихся частиц донных отложений в изгибах меандра. Показано, что при одинаковом напряжении сдвига слоя и угле ориентации прилегающего слоя на боковом уклоне частицы разной крупности движутся в разных направлениях. Этот механизм сортировки был проверен в крутых извилистых изгибах Фолл-Ривер, штат Колорадо. Обширный набор полевых данных включает в себя измерения переноса донных отложений по долям от 0,125 до 32 мм. Измерения в двух изгибах меандра подтверждают теоретическую модель: частицы размером менее  $d_{50}$  преимущественно перемещаются вверх по

точечному стержню, а частицы более грубые, чем  $d_{50}$ , движутся в направлении тальвега. Измеренный угол отклонения между средней траекторией частиц размером 0,125 и 32 мм достигает  $20^\circ$  вблизи максимума изгиба.

Полностью трехмерная негидростатическая модель была применена для расчета полей скоростей и морфодинамических процессов в лабораторном потоке [14]. Данные экспериментов были использованы при изучении эффективности различных подходов для определения переноса отложений. Первоначальная формула Ван Рейна для однородных отложений сравнивалась с двумя усовершенствованными формулами неоднородных отложений, в которых учитывалось взаимодействие между зёрнами различного размера. Это исследование показало, что настоящая численная модель способна предсказать изменения морфодинамического слоя в потоке с неоднородными отложениями.

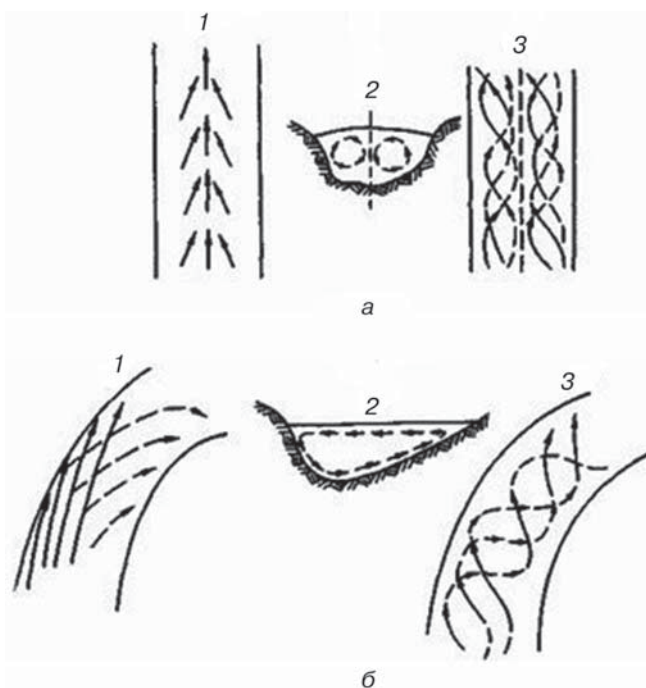
Из отечественных исследователей, изучающих меандрирующие реки, следует отметить [15]. В статье приводится географический взгляд на меандрирующие палеореки. Те же авторы [16; 17] в докладах в качестве основных причин меандрирования северных рек называют условия рельефа и климата: большую длительность зимнего периода в совокупности с низкими температурами, приводящими к обильным снегопадам, а следовательно, к значительному снеготаянию; невысокие значения годовых испарений; большие коэффициенты стока из-за наличия многолетней мерзлоты.

Изучение процесса свободного меандрирования было рассмотрено в [18], где сделан прогноз по изменению условий работы сооружений перехода в ходе развития русловых деформаций.

Во всех имеющихся на данный момент работах наблюдения приведены с географической точки зрения, без физического описания процесса. В работе [19] была получена система уравнений для расчета скорости размыва вогнутого берега и размыва плюс намыва противоположного, выпуклого берега, а также предложена модель, объединяющая воздействие потока на закругленные берега, в том числе в процессе оттаивания породы. В нашей работе мы рассмотрим основные особенности закругленного потока с целью дальнейшего применения к условиям криолитозоны для случая суженного в результате замерзания русла, в котором вследствие увеличения числа Рейнольдса происходит образование вихрей и противотечений.

## 1. Поперечные циркуляции

Как на прямолинейных участках рек, так и на поворотах можно наблюдать влияние непараллельноструйного течения потока. Русский ученый Н.С. Лелявский [20] указывал на это в конце прошлого столетия и объяснял следующим образом. Под влиянием высоких скоростей на поверхности воды на стрежне со стороны втягивается струя, приводящая к некоторому повышению уровня в центре потока. Из-за этого создаются два циркуляционных течения в плоскости, по нормали к направлению течения, которые расходятся у дна (рис. 1, а). В совокупности с поступательным движением эти течения образуют винтообразную форму движения. Течение на поверхности, устремленное к стрежню, Лелявский назвал сбойным, а расходящееся — верообразным.



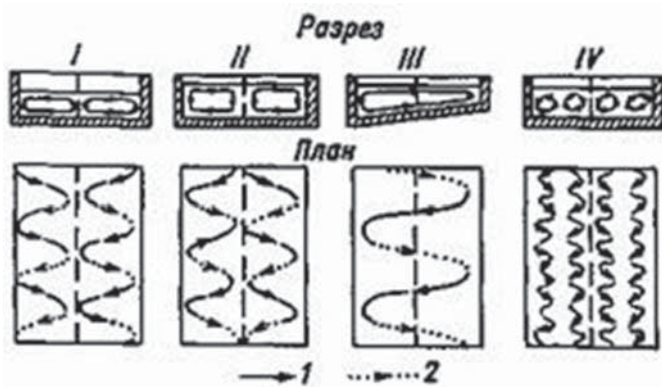
**Рис. 1.** Циркуляционные течения (по Н.С. Лелявскому [20]): а — прямолинейный участок русла; б — изогнутый участок русла; 1 — план поверхностных и донных струй; 2 — циркуляционные течения в вертикальной плоскости; 3 — винтообразные течения  
**[Figure 1.** Circulating currents (according to N.S. Lelyavsky [20]): а — straight section of the channel; б — curved section of the channel; 1 — plan of surface and bottom jets; 2 — circulation flows in a vertical plane; 3 — helical flows]

Встречаясь с вогнутой частью берега на прямолинейных участках реки струи от него отбрасываются [21]. Водные массы при встрече с этими отраженными струями, обладающими низкими скоростями, накладываются на водные массы, переносимые накатывающимися на них следующими



струями, увеличивая уровень отметки воды у вогнутого берега. Все это приводит к перекосу поверхности воды, и струи, располагающиеся у вогнутого берега, спускаются по откосу и перемещаются в придонных слоях к выпуклому противоположному берегу. Так на непрямолинейных участках рек формируется циркуляционное течение (рис. 1, б).

А.И. Лосиевский изучал особенности внутренних течений потока в лабораторных условиях [22]. В процессе исследований им были определены четыре типа внутренних течений и установлена зависимость формы циркуляционных течений от соотношения глубины и ширины потока (рис. 2). Двумя симметричными циркуляциями обладают I и II типы. I тип характеризуется расхождением струй у дна и схождением у поверхности, что присуще водотокам с неглубоким и широким руслом при незначительном воздействии берегов на поток. При II типе донные струи направлены от берегов к центру, что свойственно потокам с большой глубиной и скоростями. Тип III с односторонней циркуляцией формируется в руслах треугольной формы. При переходе типа I в тип II образуется IV промежуточный тип. При этом струи в центре потока могут быть расходящимися или сходящимися, а у берегов соответственно, сходящимися и расходящимися. Последующее изучение циркуляционных течений продолжили М.А. Великанов [23], В.М. Маккавеев, А.В. Караушев и др. Формирование поперечных течений на изгибе русла объясняется возникающей центробежной силой инерции и связанным с ней поперечным уклоном поверхности воды. Данная сила развивается на закруглениях и на разных глубинах различна.

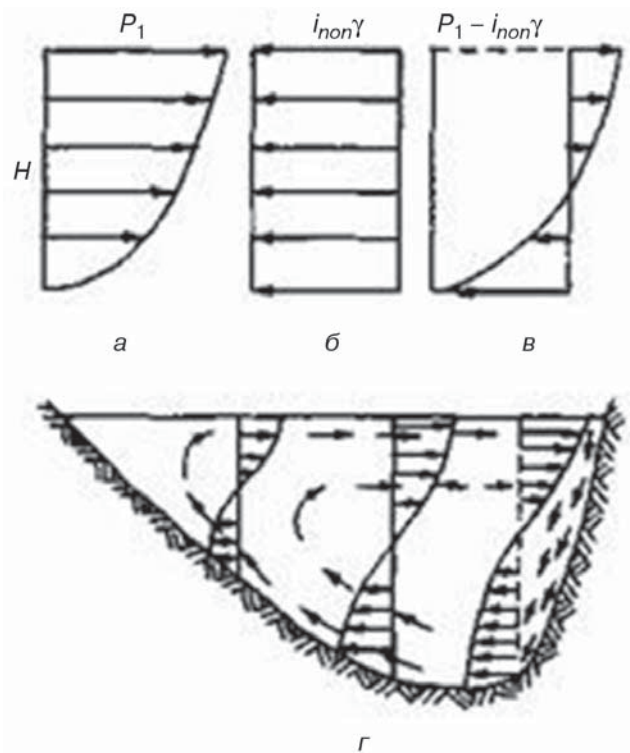


**Рис. 2.** Схема внутренних течений (по А.И. Лосиевскому [22]):  
1 — поверхностная струя; 2 — донная струя  
[Figure 2. Diagram of internal currents (according by A.I. Losievsky [22]):  
1 — surface jet; 2 — bottom jet]

С изменением глубины в сторону дна уменьшается продольная скорость, а следовательно, и центробежная сила (рис. 3, а).

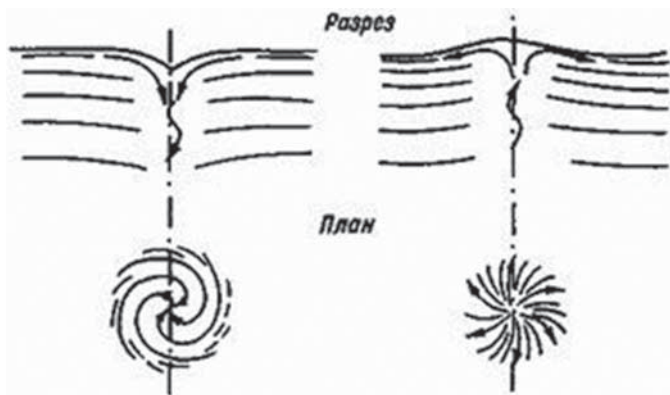
В зависимости от направления излучины отклоняющая сила Кориолиса или усиливает, или ослабляет поперечные течения на закруглении. Эта же сила возбуждает поперечные течения на прямолинейных участках.

При низких уровнях на закруглении циркуляционные течения почти не выражены. С повышением уровней, увеличением скорости и центробежной силы циркуляционные течения становятся отчетливыми. Скорость поперечных течений обычно мала — в десятки раз меньше продольной составляющей скорости. Описанный характер циркуляционных течений наблюдается до выхода воды на пойму. С момента выхода воды на пойму в реке создаются как бы два потока — верхний, долинного направления, и нижний, в коренном русле. Взаимодействие этих потоков сложно и еще мало изучено.



**Рис. 3.** Схема сложения сил, вызывающих циркуляцию:  
а — изменение по вертикали центробежной силы  $P_1$ ;  
б — избыточное давление; в — результирующая эпюра действующих на вертикали сил центробежной и избыточного давления; г — поперечная циркуляция [23]  
[Figure 3. Circulation of forces causing circulation:  
а — is the vertical change in the centrifugal force  $P_1$ ; б — is the overpressure; в — is the resulting plot of the centrifugal and overpressure forces acting on the vertical; г — is the transverse circulation [23]]

В современной литературе по динамике русловых потоков [24] приводится более строгое объяснение возникновения поперечных циркуляций в речном потоке. Их происхождение связывается с механизмом передачи на элементарные объемы воды в потоке действия кориолисова ускорения посредством градиента давления, обусловленного поперечным уклоном (и постоянным на вертикали), и разности касательных напряжений, вызванных на гранях элементарных объемов воды различиями в скоростях потока по вертикали. Аналогичную кориолисову ускорению роль выполняет на повороте русла центростремительное ускорение.



**Рис. 4.** Схема вихрей с вертикальными осями (по К.В. Гришанину [24])

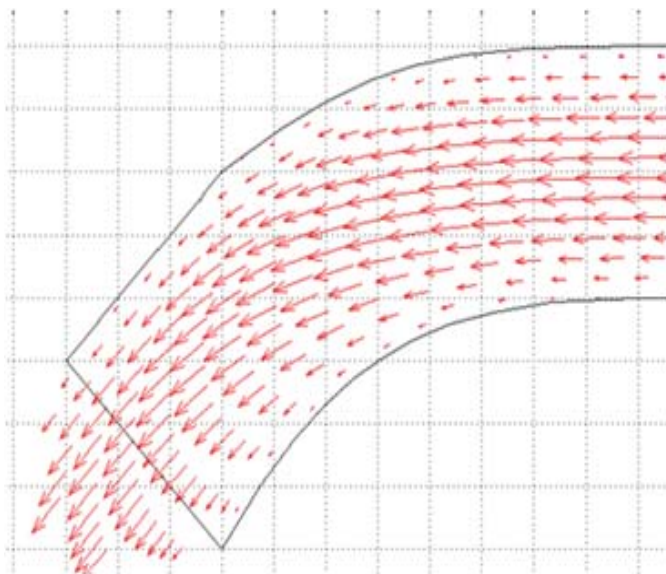
[**Figure 4.** Vortex scheme with vertical axes (by K.V. Grishanin [24])]

Помимо поперечных циркуляций, в потоке наблюдаются вихревые движения с вертикальной осью вращения (рис. 4).

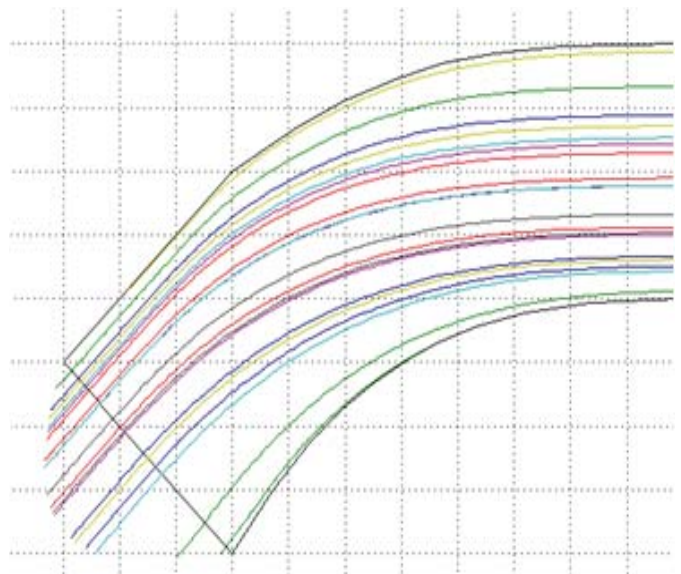
Одни из них подвижны и неустойчивы, другие стационарны и отличаются большими поперечными размерами. Чаще они возникают в местах слияния потоков, за крутыми выступами берегов, при обтекании некоторых подводных препятствий и т.д.

Поворот вызывает перераспределение скоростей по ширине и вертикалям живого сечения. На рис. 5 и 6 показано направление векторов скорости и линий тока на закруглении, полученное в программе FemLab. Анализ показывает [25], что в результате появления поперечного уклона водной поверхности в начале закругления величина максимальной скорости смещается к внутреннему, выпуклому берегу. В закруглении из-за обмена количеством движения между плановыми струями водного потока, вызванного поперечной циркуляцией, скорости перераспределяются, и величина максимальной скорости постепенно перемещается к наружному, вогнутому берегу. Там же, где поперечный уклон и центробежная сила уже не имеют влияния, т.е. на выходе из закругления, величины максимальных скоростей располагаются на большом протяжении у самого продолжения вогнутого берега.

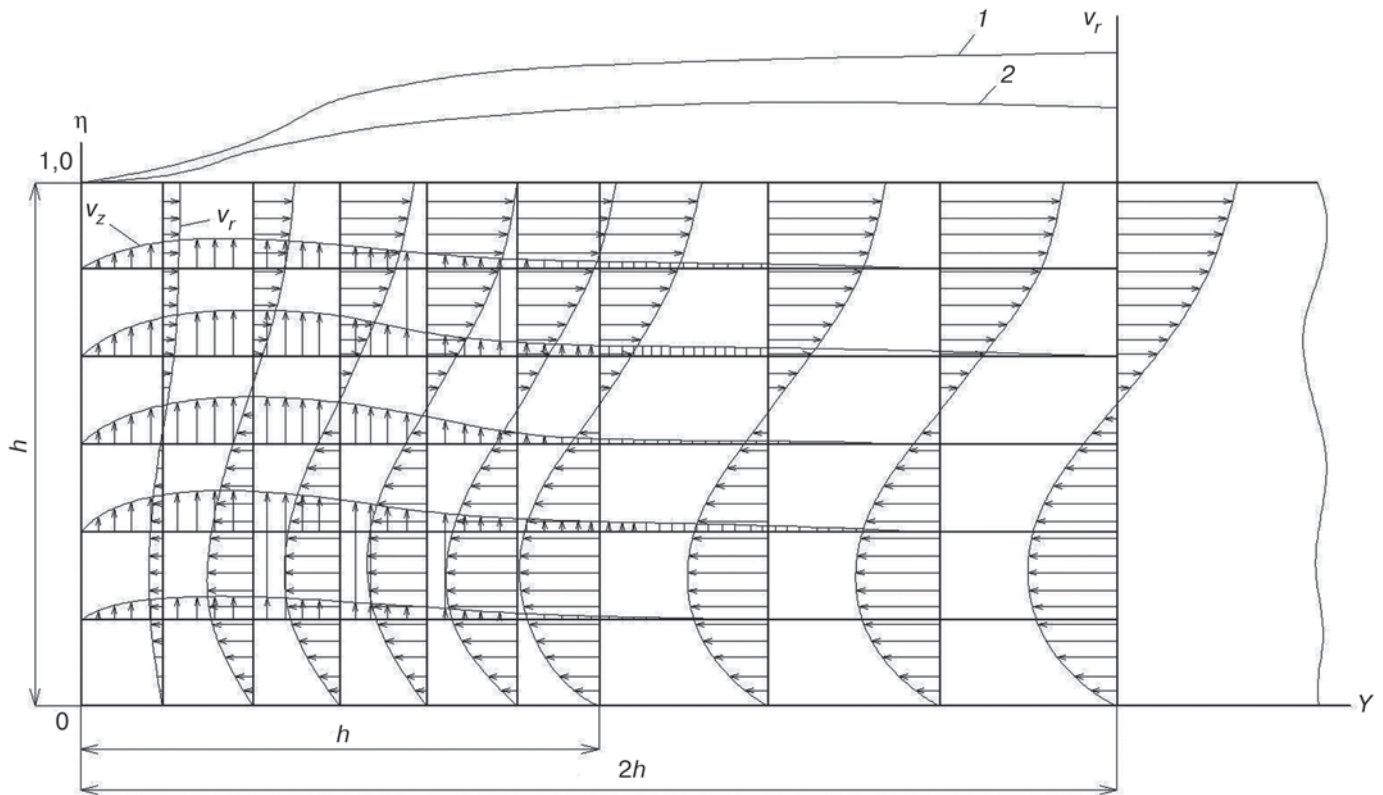
При закруглении потока линии тока упираются во внешний берег, усиливают друг друга и таким образом скорость на стрежне увеличивается. По за-



**Рис. 5.** Направления результирующих векторов скорости потока на закруглении  
[**Figure 5.** The directions of the resultant flow velocity vectors at the rounding]



**Рис. 6.** Линии тока (одинаковых скоростей) в потоке на закруглении  
[**Figure 6.** Current lines (same speeds) in flow at rounding]



**Рис. 7.** Распределение скоростей  $v_r$  и  $v_z$  (в цилиндрических координатах) по сечению на повороте русла:  
 1 — придонная скорость; 2 — поверхностная скорость  
**[Figure 7.** The velocity distribution  $v_r$  and  $v_z$  (in cylindrical coordinates) over the cross section at the turn of the channel:  
 1 — bottom velocity; 2 — surface speed]

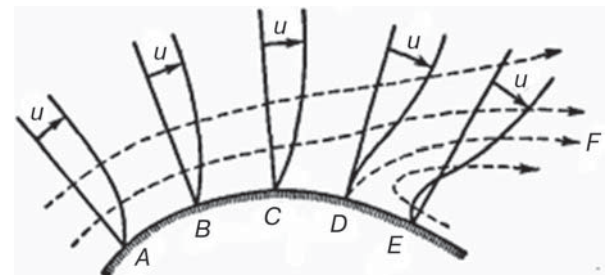
кону Бернулли расход остается прежним, и, как следствие, у противоположного, внутреннего берега возникают противотечения, которые возрастают с возрастанием числа Рейнольдса.

По [25] в реальном закругленном потоке всегда появляются поперечные составляющие скорости  $v_r$  и  $v_z$ , и все движение принимает винтообразный характер (рис. 7).

В итоге на формирование русел рек и перенос наносов значительное влияние оказывают как вихревые движения, так и поперечные циркуляции.

## 2. Вихри, вызванные отрывом пограничного слоя на повороте русла

При возрастании скорости потока (и, следовательно, числа Рейнольдса) движение на закруглении можно считать обтеканием препятствия, подразумевая под препятствием внутренний, выпуклый берег. Так как геометрия потока в плане имеет вид перевернутой трапеции, то трехмерное поле скоростей выглядит сложным образом.



**Рис. 8.** Схематическая форма линий тока (пунктир) и профилей скорости (сплошные линии) над различными точками при обтекании прямого цилиндра  
**[Figure 8.** The schematic shape of the streamlines (dotted line) and velocity profiles (solid lines) above different points when flowing around a straight cylinder]

Формирование турбулентного следа в обтекающем потоке часто связано с тормозящим влиянием отрицательного продольного градиента давления [26]. Если рассмотреть обтекание прямого круглого цилиндра перпендикулярным к оси потока без циркуляции, то можно говорить о том, что вне пограничного слоя происходит безвихревое движение, а жидкость принимается идеальной.

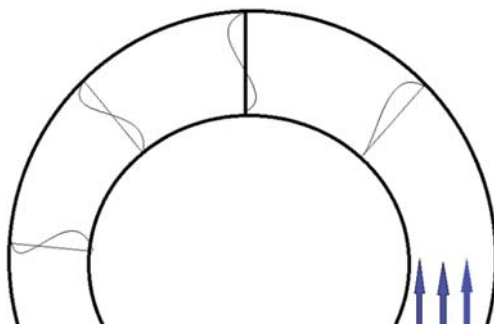


Линии тока этого потенциального движения максимально сгущаются над верхней точкой цилиндра (точка  $C$ ), где касательная скорость и достигает максимума. Вследствие известного уравнения Бернулли  $\frac{U^2}{2} + \frac{p}{\rho} = \text{const}$  давление над точкой  $C$  во внешнем потоке достигает минимума, так что на участке  $AC$  оно возрастает, а на участке  $CE$  падает. Такие же изменения давления вдоль поверхности тела имеют место и в пограничном слое (так как поперек пограничного слоя давление почти не меняется). Следовательно, на участке  $CE$  жидкость в пограничном слое должна двигаться по направлению возрастания давления, что приводит к ее торможению. Наиболее сильно это торможение сказывается, конечно, на частицах жидкости, движущихся около самой поверхности обтекаемого тела, т.е. обладающих наименьшей скоростью. В некоторой точке  $D$  вниз по потоку от точки  $C$  эти частицы останавливаются, а за точкой  $D$  даже двигаются вспять по сравнению с более удаленными от поверхности цилиндра и поэтому еще не заторможенными частицами. Образующийся у поверхности тела за точкой  $D$  возвратный поток оттесняет внешнее течение от поверхности цилиндра — происходит так называемый отрыв пограничного слоя от обтекаемой поверхности с образованием в жидкости поверхности раздела  $DF$ . Если скорость  $U$  внешнего потока достаточно быстро убывает за точкой  $C$ , то такой отрыв пограничного слоя обязательно будет иметь место. Если пограничный слой до отрыва был ламинарным, то после отрыва он ведет себя как свободная струя в затопленном пространстве и быстро становится турбулентным (при заметно меньших  $Re$ , чем не отрывавшийся пограничный

слой, так как наличие стенки действует на течение стабилизирующим образом). Поверхность раздела  $DF$ , являющаяся поверхностью тангенциального разрыва скорости, весьма неустойчива и быстро свертывается в один или несколько вихрей. В области  $FDE$  за поверхностью раздела около цилиндра образуется крупный вихрь, второй такой же вихрь образуется в нижней части цилиндра. Эти вихри попеременно отрываются от поверхности цилиндра, уносятся вниз по течению и постепенно рассеиваются, на их месте образуются новые вихри.

В результате за телом образуется турбулентный след, в котором движение является завихренным, в то время как вне этого следа и вне пограничного слоя движение является безвихревым (т.е. потенциальным). Действительно, жидкость вне пограничного слоя можно считать идеальной, а значит, при ее движениях циркуляция скорости вдоль любого замкнутого жидкого контура сохраняется, следовательно, при установившемся движении имеет место постоянство вихря скорости вдоль линий тока. По этой причине область завихренного турбулентного движения вдали от поверхности тела может возникнуть только при выходе линий тока из пограничного слоя (в котором движение становится завихренным вследствие действия вязкости) наружу, т.е. лишь в связи с непосредственным перемещением жидкости из пограничного слоя в удаленные части пространства.

Также в [27] было показано, что в областях торможения потока происходит отрыв пограничного слоя и образование вихрей. Вихри под действием модифицированной силы Жуковского поднимаются вверх, на порядок увеличивая интенсивность массообмена.



**Рис. 9.** Эпюры поверхности скорости в потоке на закруглении (в круговом лотке)  
**[Figure 9.** Plots of the surface velocity in the flow at the rounding (in a circular tray)]

### 3. Лабораторные эксперименты

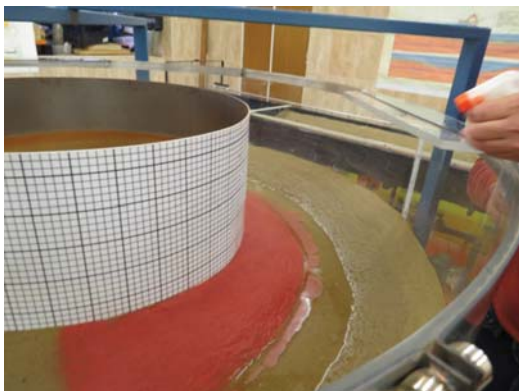
Были проведены эксперименты по определению размыва внутреннего и внешнего берегов в круговом лотке (внутренний радиус закругления 35 см, внешний радиус закругления 75 см). Органические примеси, содержащиеся в материале (песке), позволили визуализировать поверхностную эпюру скорости участка потока (рис. 9).

У внутренней границы потока наблюдалось противотечение с образованием единичных вихрей. После удаления воды было видно, что воздействие потока на разные склоны неодинаково — на внешнем, вогнутом склоне при скорости потока выше критической образовались выраженные гряды, тогда как на внутреннем склоне гряды не образовались, таким образом, скорости на внутреннем склоне были достаточными для размыва, но недостаточными для образования гряд. Нижняя часть внутреннего (окрашенного) склона размывалась больше, чем верхняя, что свидетельствует об увеличении модуля скорости с постоянным градиентом от поверхности ко дну на этом участке. Все это позволяет сделать вывод о характере распределения скоростей в закругленном потоке.

### 4. Транспортирующая способность потока на закруглении

При возрастании числа Рейнольдса на закруглении неизбежно возникают противотечения, что сказывается на характере переносимых наносов. Принимая во внимание изменение льдистости, В.К. Дебольский [28] вывел зависимость транспортирующей способности водного потока:

$$S_{\text{тр}} = 2,4 \cdot 10^{-3} \frac{U^3}{ghw}, \quad (1)$$



где  $S$  — транспортирующая способность потока;  $U$  — средняя скорость потока;  $h$  — глубина потока;  $w$  — гидравлическая крупность незамерзшего материала.

В общем случае распределение скоростей по ширине (в цилиндрических координатах) при входе в закругление, очерченное по дуге круга, выражается формулой

$$v_{\Theta} = \frac{1}{r} \sqrt{\int r^2 \frac{d(v_0^2)}{dr} dr + c}, \quad (2)$$

где  $r$  — больший радиус;  $v_0$  — средняя по вертикали скорость перед закруглением;  $v_{\Theta}$  — соответствующая ей скорость на закруглении;  $\Theta$  — угол, отсчитываемый от начала закругления.

Постоянную величину  $c$  можно определить из условия неразрывности, т.е. из равенства расходов  $Q$  жидкости перед закруглением и на нем:

$$Q = \int_{r_{\text{вн}}}^{r_{\text{нар}}} v_0 h dr = \int_{r_{\text{вн}}}^{r_{\text{нар}}} \frac{h}{r} \sqrt{\int r^2 \frac{d(v_0^2)}{dr} dr + c}, \quad (3)$$

где  $r_{\text{вн}}$  и  $r_{\text{нар}}$  — радиусы выпуклого и вогнутого берегов соответственно;  $h$  — глубина по вертикали.

### Заключение

По результатам физического моделирования с учетом скоростей на поверхности водотока получена система уравнений, описывающая транспортирующую способность водного потока в условиях льдистости на участке поворота русла. Эта система применима в случае ламинарного потока.

В природных условиях в зимний период для таких участков характерно сужение потока вследствие частичного промерзания русла, образования шугохода или затора. В результате скорости потока уве-



Рис. 10. Вид русла до начала эксперимента и после  
[Figure 10. View of the channel before the experiment and after]



личиваются, а сам поток становится турбулентным. Лабораторные эксперименты, проведенные в круговой установке гидравлической лаборатории РУДН, имитирующей участок поворота русла, показали, что в случае увеличения скоростей потока, входящих в закругление, или увеличения числа Рейнольдса в потоке неизбежно возникают вихревые движения и противотечения у внутреннего склона. При этом поле скоростей приобретает иной вид, что неизбежно сказывается на характере размыва русла. Данная задача требует дальнейших исследований и проработки.

## Список литературы

- [1] *Ikeda S., Parker G., Sawai K.* Bend theory of river meanders. Part 1. Linear development // *Journal of Fluid Mechanics*. 1981. Vol. 112. Pp. 363–377.
- [2] *Ikeda S., Nishimura T.* Flow and bed profile in meandering sand-silt rivers // *Journal of Hydraulic Engineering*. 1986. Vol. 112. No. 7. Pp. 562–579.
- [3] *Osman M.A., Thorne C.R.* Riverbank stability analysis. I: Theory // *Journal of Hydraulic Engineering*. 1988. Vol. 114. No. 2. Pp. 134–150.
- [4] *Parker G., Andrews E.D.* On the time development of meander bends // *Journal of Fluid Mechanics*. 1986. Vol. 162. Pp. 139–156.
- [5] *Sun T., Meakin P., Jossang T., Schwarz K.* A simulation model for meandering rivers // *Water Resources Research*. 1996. Vol. 32. Pp. 2937–2954.
- [6] *Lancaster S.T., Bras R.L.* A simple model of river meandering and its comparison to natural channels // *Hydrological Processes*. 2002. Vol. 16. No. 1. Pp. 1–26.
- [7] *Kuntjoro K., Bisri M., Masrevaniah A., Suharyanto A.* Modeling of discharge fluctuation influence on river meandering geometry change // *International Journal of Academic Research. Part A*. 2012. Vol. 4. No. 6. Pp. 189–196.
- [8] *Duan J.G., Julien P.Y.* Numerical simulation of the inception of channel meandering // *Earth Surface Processes and Landforms*. 2005. Vol. 30. Pp. 1093–1110.
- [9] *Kuntjoro K., Didik Harijanto.* The Movement of the Regularly River Meanders on Constant Discharge // *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2018. Vol. 9. No. 6. Pp. 619–629.
- [10] *Engelund F.* Flow and bed topography in channel bend // *Journal of Hydraulic Division*. 1974. Vol. 100. No. 11. Pp. 1631–1648.
- [11] *Crosato A.* Simulation of meandering river processes // *Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering / Delft University of Technology*. Delft, 1990.
- [12] *Duan J.G.* Simulation of flow and mass dispersion in meandering channels // *Journal of Hydraulic Engineering*. 2004. Vol. 130. No. 10. Pp. 964–976.
- [13] *Julien P.Y., Anthony D.J.* Bedload motion and grain sorting in a meandering stream // *Journal of Hydraulic Research*. 2002. Vol. 40. No. 2. Pp. 125–133.
- [14] *Olsen N.R.B.* Three-dimensional CFD modelling of self-forming meandering channel // *Journal of Hydraulic Engineering*. 2003. Vol. 129. No. 5. Pp. 366–372.
- [15] *Сидорчук А.Ю., Панин А.В., Борисова О.К.* Позднеледниковые палеорусла рек Западной Сибири // *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. 2008. № 2. С. 67–75.
- [16] *Сидорчук А.Ю., Панин А.В., Борисова О.К.* Речной сток на Восточно-Европейской равнине за последние 20 тысяч лет и проблема изменения уровней южных морей // *Гидрологические изменения*. Сб. 145. Кодекс, 2018. С. 144–168.
- [17] *Сидорчук А.Ю., Панин А.В., Борисова О.К.* Снижение стока рек равнин Северной Евразии в оптимум голоцена // *Водные ресурсы*. 2012. Т. 39. № 1. С. 40–53.
- [18] *Жолудев Д.М., Плотников А.Н., Слабожанин Г.Д.* Изучение процессов свободного меандрирования рек // *Избранные доклады 64-й Университетской научно-технической конференции студентов и молодых ученых*. Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2018. С. 790–792.
- [19] *Масликова О.Я.* Деформации мерзлых склонов рек на повороте русла при наличии движущихся судов // *Строительство: наука и образование*. 2018. Т. 8. Вып. 3. Ст. 4. С. 54–66.
- [20] *Лелявский Н.С.* О речных течениях и формировании речного русла // *Труды 2-го Съезда инженеров-гидротехников в 1893 г.* СПб., 1893. (Вопросы гидротехники свободных рек. М.: Речиздат, 1948. С. 18–136.)
- [21] *Давыдов Л.К., Дмитриева А.П., Конкина Н.Г.* Общая гидрология. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 462 с.
- [22] *Лосиевский А.И.* Лабораторные исследования процессов образования перекаатов // *Труды ЦНИИВТ*. 1934. Вып. 36. 98 с.
- [23] *Великанов М.А.* Гидрология суши. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 455 с.
- [24] *Гришанин К.В.* Основы динамики русловых потоков. М.: Транспорт, 1990. 320 с.
- [25] *Розовский И.Л.* Движение воды на повороте открытого русла. Киев: Изд. АН УССР, 1957. 188 с.
- [26] *Монин А.С., Яглом А.М.* Статистическая гидромеханика. Механика турбулентности. Часть I. М.: Наука, 1965. 640 с.
- [27] *Мельникова О.Н., Петров В.П., Масликова О.Я.* Экспериментальное исследование массообмена в придонном слое открытого потока со стационарными волнами // *Вестник МГУ. Серия 3: Физика. Астрономия*. 1994. Т. 35. № 5. С. 59–66.
- [28] *Дебольский В.К. и др.* Динамика русловых потоков и литодинамика прибрежной зоны моря. М.: Наука, 1994. 303 с.

### Для цитирования:

*Масликова О.Я., Грищук И.И., Ионов Д.Н., Дебольский В.К.* Влияние распределения скоростей в закругленном потоке на характер размыва береговых склонов // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования*. 2019. Т. 20. № 1. С. 85–95. DOI 10.22363/2312-8143-2019-20-1-85-95

## Influence of speed distribution in a rounded flow on the character of slopes erosion

O.Ya. Maslikova\*, I.I. Gritsuk†, D.N. Ionov‡, V.K. Debolskiy§

\*†‡§ Water Problems Institute of Russian Academy of Sciences (IWP RAS), 3 Gubkina St., Moscow, 119333, Russian Federation

† Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St., Moscow, 117198, Russian Federation

‡ Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), 64 Leningradsky prospect, Moscow, 125319, Russian Federation

### Article history:

Received: October 12, 2018

Revised: January 21, 2019

Accepted: January 29, 2019

### Keywords:

flow heading;

counterflow;

vortex;

soil erosion

One of the most important issues of river hydraulics is the movement of water and the formation of a channel in a stream that has a non-straight-line outline in the plan. Under natural conditions for rivers characteristic winding shape in the plan. The curvature of the jet occurs when the flow is divided into sleeves, at the inflow into the river, the confluence of flows, etc. Therefore, the study of channel processes in rivers is impossible without knowledge of the flow patterns at the curve of the channel.

When designing hydraulic structures, including bridge crossings on the meandering sections of rivers, one should know the features of the dynamics of the channel in the sections of the flow turning. In winter, such areas may be narrowed due to the freezing of the channel, and during the period of ice thawing they are clogged with ice fragments. The narrowing of the canal causes an increase in the Reynolds number and a redistribution of velocity diagrams in the area under consideration, which causes a change in the erosion pattern.

In laboratory conditions, the nature of the distribution of velocities and the formation of vortices on the installation, creating a rounded flow. It is shown that, at critical Reynolds numbers, a vortex countercurrent occurs in the rounded flow at the inner shore. The impact of this velocity distribution on the erosion pattern of the various slopes of the rounded flow was analyzed.

## References

- [1] Ikeda S, Parker G, Sawai K. Bend theory of river meanders. Part 1. Linear development. *Journal of Fluid Mechanics*. 1981;112: 363–377.
- [2] Ikeda S, Nishimura T. Flow and bed profile in meandering sand-silt rivers. *Journal of Hydraulic Engineering*. 1986;112(7): 562–579.
- [3] Osman MA, Thorne CR. Riverbank stability analysis. I: Theory. *Journal of Hydraulic Engineering*. 1988;114(2): 134–150.
- [4] Parker G, Andrews ED. On the time development of meander bends. *Journal of Fluid Mechanics*. 1986;162: 139–156.
- [5] Sun T, Meakin P, Jossang T, Schwarz K. A simulation model for meandering rivers. *Water Resources Research*. 1996;32: 2937–2954.
- [6] Lancaster ST, Bras RL. A simple model of river meandering and its comparison to natural channels. *Hydrological Processes*. 2002;16(1): 1–26.
- [7] Kuntjoro K, Bisri M, Masreवानiah A, Suharyanto A. Modeling of discharge fluctuation influence on river meandering geometry change. *International Journal of Academic Research. Part A*. 2012;4(6): 189–196.
- [8] Duan JG, Julien PY. Numerical simulation of the inception of channel meandering. *Earth Surface Processes and Landforms*. 2005;30: 1093–1110.
- [9] Kuntjoro K, Didik Harijanto. The Movement of the Regularly River Meanders on Constant Discharge. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2018;9(6): 619–629.
- [10] Engelund F. Flow and bed topography in channel bend. *Journal of Hydraulic Division*. 1974;100(11): 1631–1648.
- [11] Crosato A. Simulation of meandering river processes. *Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering*. Delft, The Netherlands; 1990.
- [12] Duan JG. Simulation of flow and mass dispersion in meandering channels. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2004;130(10): 964–976.

**Acknowledgments.** This study was supported by state program No. 0147-2019-0001 (registration No. AAAA-A18-118022090056-0) and by RFBR, project No. 18-05-00178.

\* Senior Researcher of Channel Flow Dynamics and Ice Thermal Conditions Laboratory, Candidate of Technical Sciences

† Associate Professor of Department of Construction, Academy of Engineering; Senior Researcher, Candidate of Technical Sciences; Channel Flow Dynamics and Ice Thermal Conditions Laboratory; Associate Professor, Department of Hydraulic, Candidate of Technical Sciences; gritsuk\_ii@rudn.ru

‡ Senior Researcher of Channel Flow Dynamics and Ice Thermal Conditions Laboratory, Candidate of Technical Sciences

§ Head of Channel Flow Dynamics and Ice Thermal Conditions Laboratory, Doctor of Technical Sciences, Professor

- [13] Julien PY, Anthony DJ. Bedload motion and grain sorting in a meandering stream. *Journal of Hydraulic Research*. 2002;40(2): 125–133.
- [14] Olsen NRB. Three-dimensional CFD modelling of self-forming meandering channel. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2003;129(5): 366–372.
- [15] Sidorchuk AYu, Panin AV, Borisova OK. Pozdnelednikovye paleorusla rek Zapadnoy Sibiri [Late glacial paleorusla rivers of Western Siberia]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Seriya geograficheskaya*. 2008;(2): 67–75. (In Russ.)
- [16] Sidorchuk AYu, Panin AV, Borisova OK. Rechnoy stok na Vostochno-Yevropeyskoy ravnine za poslednie 20 tysyach let i problema izmeneniya urovney yuzhnykh morey [River flow on the East European Plain over the past 20 thousand years and the problem of changing the levels of the southern seas]. *Gidrologicheskie izmeneniya. Sb. 145*. Moscow: Kodeks; 2018. p. 144–168. (In Russ.)
- [17] Sidorchuk AYu, Panin AV, Borisova OK. Snizhenie stoka rek ravnin Severnoy Yevrazii v optimum golotsena [Reducing the flow of the rivers of the plains of Northern Eurasia in the optimum holocene]. *Vodnye resursy*. 2012;39(1): 40–53. (In Russ.)
- [18] Zholudev DM, Plotnikov AN, Slabozhanin GD. Izuchenie protsessov svobodnogo meandrirovaniya rek [Study of the processes of free meandering of rivers]. *Izbrannye doklady 64-y universitetskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov i molodykh uchenykh*. Tom. gos. arkhiv.-stroit. unta Publ.; 2018. p. 790–792. (In Russ.)
- [19] Maslikova OYa. Deformatsii merzlykh sklonov rek na povorote rusla pri nalichii dvizhushchikhsya sudov [Deformations of frozen river slopes at the turn of the channel in the presence of moving vessels]. *Stroitelstvo: nauka i obrazovanie*. 2018;8(3): 54–66. (In Russ.)
- [20] Lelyavskiy NS. O rechnykh techeniyakh i formirovanii rechnogo rusla [On the river currents and the formation of the river bed]. *Trudy 2-go Sezda inzhenerov-gidrotekhnikov v 1893 g*. Saint Petersburg; 1893. (*Voprosy gidrotekhniki svobodnykh rek*. Moscow: Rechizdat Publ.; 1948. p. 18–136.) (In Russ.)
- [21] Davydov LK, Dmitrieva AP, Konkina NG. *Obshchaya gidrologiya [General hydrology]*. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1973. (In Russ.)
- [22] Losievskiy AI. Laboratornye issledovaniya protsessov obrazovaniya perekatov [Laboratory studies of roll formation processes]. *Trudy TsNIIVT*. 1934;36. (In Russ.)
- [23] Velikanov MA. *Gidrologiya sushy [Land hydrology]*. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ.; 1974. (In Russ.)
- [24] Grishanin K.V. *Osnovy dinamiki ruslovykh potokov [Basics of channel flow dynamics]*. Moscow: Transport Publ.; 1990. (In Russ.)
- [25] Rozovskiy IL. *Dvizhenie vody na povorote otkrytogo rusla [The movement of water at the turn of an open channel]*. Kiev: AN USSR Publ.; 1957 (In Russ.)
- [26] Monin AS, Yaglom AM. *Statisticheskaya gidromekhanika. Mekhanika turbulentsi. Chast I [Statistical hydromechanics. Mechanics of turbulence. Part I]*. Moscow: Nauka Publ.; 1965. (In Russ.)
- [27] Melnikova ON, Petrov VP, Maslikova OYa. Eksperimentalnoe issledovanie massoobmena v pridonnom sloe otkrytogo potoka so statsionarnymi volnami [Experimental study of mass transfer in the bottom layer of an open flow with stationary waves]. *Vestnik MGU. Seriya 3: Fizika. Astronomiya*. 1994;35(5): 59–66. (In Russ.)
- [28] Debolskiy VK et al. *Dinamika ruslovykh potokov i litodinamika pribrezhnoy zony moray [Dynamics of channel flows and lithodynamics of the coastal zone of the sea]*. Moscow: Nauka Publ.; 1994. (In Russ.)

**For citation:**

Maslikova OYa, Gritsuk II, Ionov DN, Debolsky VK. Influence of speed distribution in a rounded flow on the character of slopes erosion. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2019;20(1): 85–95. DOI 10.22363/2312-8143-2019-20-1-85-95 (In Russ.)