

ГЛАВА 3 ВЛИЯНИЕ ВИХРЕЙ НА РАЗМЫВ ДНА

§1 ИСТОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЕФОРМАЦИИ РУСЛА

В результате взаимодействия турбулентного открытого потока воды с руслом, состоящим из дискретных частиц ("несвязный" грунт), на дне образуются регулярные формы - гряды, высота которых иногда сравнима с глубиной потока. Форма гряд зависит от скорости потока и размера донных частиц. Наиболее разнообразные формы возникают на песчаном дне: гряды с параллельными гребнями, перпендикулярными направлению потока, трехмерные гряды, гребни которых расположены в шахматном порядке, подковообразные гряды. Одновременно на речном дне могут существовать гряды длиной от нескольких сантиметров до нескольких метров. Если частицы дна очень мелкие (по данным В. К. Дебольского $d < 0.1$ мм), то между отдельными частицами появляется сцепление, и на таком "связном" грунте вместо гряд образуется система промоин. На галечном грунте невысокие гряды имеют обычно параллельные гребни (пороги), перпендикулярные направлению потока. Однако в паводок формируются и трехмерные гряды большой высоты.

Регулярное изучение деформации дна рек геологами и гидротехниками началось с середины XIX века (судоходство и строительство сооружений на реках). В конце девятнадцатого века были опубликованы работы следующих исследователей: Hunt (1882), Candoll (1893), Darwin, (1883), Cornish (1897) и др. На рубеже XIX и XX веков появились первые работы, связывающие формирование песчаных гряд с общим ходом руслового процесса. Это работы В.М. Лохтина, Н.С. Лелявского, Блазиуса (Blasius). Первая экспериментальная работа (Hahmann) посвящена определению зависимости длины песчаных гряд от скорости и глубины потока, плотности и вязкости жидкости, плотности и размера частиц. К настоящему времени исследователями в различных странах выполнены сотни экспериментальных и натуральных наблюдений, позволивших выяснить основные особенности образования гряд и излучин рек.

Созданные к середине XX века модели, описывающие формирование гряд можно условно разбить на следующие группы: турбулентные теории, связывающие возникновение гряд с пульсациями скорости в турбулентном потоке (М.А. Великанов, Н.А. Михайлова, К.И. Россинский, И.А. Кузьмин), вихревые теории, предполагающие наличие в потоке неподвижных вихрей, вращающихся как твердое тело (Н.Т. Повало-Швейковский, А.Л. Raudkivi, К.В. Гришанин), теории исследующие устойчивость двухфазного и однофазного потока (Candoll, Lui Hsin-Kuan, Снищенко Б.Ф.). Однако ни одна из предложенных теорий не включает все особенности процесса и не позволяет рассчитать параметры гряд по известным характеристикам потока.

М.А. Великанов, Н.А. Михайлова, Б.А. Фидман. 1936-1966гг. [18,19,20] провели большую серию экспериментальных исследований в Лаборатории русловых процессов АН СССР, в лаборатории МИИТ и, позднее, на кафедре руслового процесса физического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова. Исследования гряд проводились параллельно с исследованием поля скорости потока. Широкое применение фото и киносъемки, аппаратуры позволило установить следующие основные результаты. Поле скорости (мгновенные и осредненные составляющие) течения имеет устойчивые пространственные структуры, масштаб которых

сопоставим с глубиной потока и размером гряд на его дне. Структуры такого же порядка обнаружены и в поле мутности. Авторы связали эти структуры с существованием крупномасштабных турбулентных образований. За грядой обнаружен валец с горизонтальной осью, перпендикулярной направлению потока. Обнаружены периодические выбросы групп песчинок из хвостовой части гряды. Песчинки перемещаются в потоке по дуге. Показано, что формирования гряд на плоском дне начинается с появления прямых бороздок, перпендикулярных направлению течения. Бороздки образуются на одинаковом расстоянии друг от друга. Из бороздок происходит периодический выброс песка. Бороздки не смещаются вдоль по потоку. Выброшенный песок оседает между бороздками, формируя гряду. Высокие параллельные гряды преобразуются в трехмерные гряды, расположенные в шахматном порядке.

Кнорроз В.С. 1950-1960 [21] эксперименты проводил в лотке длиной 12 метров, шириной 63 сантиметра, в диапазоне глубин от 6 до 80 см. Использовались 10 разновидностей песка и гравия с диаметром от 0.16мм до 18 мм. Автор обнаружил периодические в пространстве структуры в поле мутности. При использовании мелких частиц со средним диаметром, не превышающим 0.5мм, на дне потока наблюдаются все типы гряд. При использовании крупных частиц, со средним диаметром превышающим 1-1.5мм на дне потока наблюдаются только гряды с параллельными гребнями. За гребнями гряд наблюдался валец с горизонтальной осью, перпендикулярной направлению потока.

"Не передвигающая скорость". Самые первые исследователи песчаных гряд установили, что для данных условий гряды на дне начинают образовываться, начиная с некоторого значения скорости, которая получила различные названия, в том числе и такое, как в заголовке этого пункта. Обширные экспериментальные данные приведены в монографиях [22], [23]. Разброс значений "не передвигающей" скорости очень велик. В работе [24] приведены результаты весьма тонких экспериментов, в которых показано, что если время наблюдения за частицами дна выбрано достаточно большим, то не существует таких условий, при которых частицы оставались бы в полном покое.

Основным видом деформации дна каналов является формирование регулярных структур, имеющих вид поперечных гряд. При формировании гряд на первоначально ровном дне, сначала возникают поперечные параллельные канавки, имеющие четкий регулярный характер [22]. В [25 – 27] предполагается, что гряды формируются исключительно когерентными турбулентными структурами "BURST". В [28] обнаружено формирование гряд потоком с числом Рейнольдса $Re < 2000$ для диаметра донных частиц 0.6-5 мм. В [29 – 31] гряды обнаружены в потоке с $Re < 1030$. Такие потоки принято считать ламинарными. Тем не менее, даже при таких низких числах Рейнольдса гряды образовывались, хотя время формирования гряды было очень большим – около 1 часа.

Первые количественные соотношения между частотой образования когерентных структур и перемещением донных частиц были получены в [32]. Под когерентными турбулентными структурами понимают периодический выброс струек со дна (рис. 1.4 и рис. 1.5). На рубеже XX и XXI веков на кафедре физики моря и вод суши физического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова было установлено, что эти когерентные структуры представляют собой цилиндрические вихри описанные выше. Как же вихри влияют на размыв дна канала?

§2 ПЕСЧИНКИ В ВИХРЕ

На фотографиях вихрей, приведенных в предыдущих главах видно, что вихри спутники интенсивно окрашиваются частичками марганцовки, насыпанной на дно канала. Каким же образом вихри спутники удерживают частички марганцовки, плотность которой почти в 4 раза превосходит плотность воды?

Пусть частичка, плотность которой выше плотности воды захватывается вихрем спутником при его формировании. Уравнение движения в системе координат, связанной с центром инерции вихря, можно записать для сферической песчинки согласно [33]:

$$\rho_p d\vec{u} / dt = -\nabla p - q(\vec{u} - \vec{v}) + \vec{g}\rho_p \quad (3.1)$$

Здесь u – скорость частички, v – скорость жидкости в вихре, ρ_p – плотность частички, $q = 18\nu\rho_f / d^2$ – коэффициент трения, ν – кинематическая вязкость воды, g – ускорение силы тяжести. Радиальную составляющую градиента давления внутри вихря можно записать [14]:

$$\frac{\partial p}{\partial r} = \rho_f (\omega^2 r - g \sin(2\pi - \theta)) \quad (3.2)$$

Здесь ρ_f – плотность жидкости, $\theta = \omega t$ – азимутальный угол. Численный анализ показал, что для частички, размер которой хотя бы на порядок меньше размера вихря, можно считать, что угловая скорость вращения частички и вихря совпадают. В этом случае радиальную составляющую ускорения песчинки можно записать [9]:

$$\dot{u}_r = (1 - \rho_f / \rho_p)(r\omega^2 - g \sin(2\pi - \theta)) - \frac{q}{\rho_p} u_r \quad (3.3)$$

Если плотность частицы выше плотности жидкости, то частица движется к границе вихря, в противном случае – легкие частицы собираются в центре вихря.

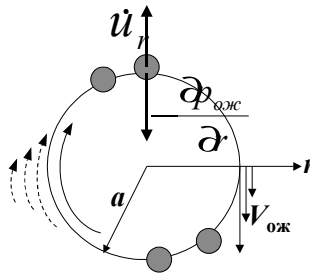


Рис. 3.1 Схема сил, действующих на тяжелую частичку на внешней границе вихря

Что же происходит с тяжелой частицей, достигшей границы вихря? Здесь на нее действует сила со стороны жидкости, окружающей вихрь, увлеченной во вращение силами вязкости. Для жидкости, окружающей вихрь радиуса a , поле скорости является потенциальным и может быть описано следующим образом [34]:

$$v_{ож}(r, t) = \frac{a^2 \omega}{r} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{r^2}{4\nu t}\right) \right\} \quad (3.4)$$

Скорость вращения окружающей жидкости быстро падает в направлении оси r , что обуславливает значительный положительный градиент давления. В соответствии с уравнением движения, в таком поле давления на частичку действует сила, направленная к центру вихря. Эта сила и удерживает частичку на границе вихря.

Присутствие тяжелых частичек на внешней границе вихря позволяет увидеть на видеозаписи четкие контуры вихрей спутников. Основной вихрь формируется у верхней границы придонного слоя и может захватывать только частицы нейтральной плавучести. Этим объясняется более расплывчатый контур основных вихрей, которые видны, в большой степени, благодаря рассеянию света на вихрях.

Ниже на рисунке приведен кадр видеозаписи, на котором хорошо видны вихри спутники, за счет песчинок захваченных со дна канала [35]. Основной вихрь совсем не заметен в левом триполе. В центральном триполе, который начал подниматься вверх, рассеянный свет позволяет различить основной вихрь.

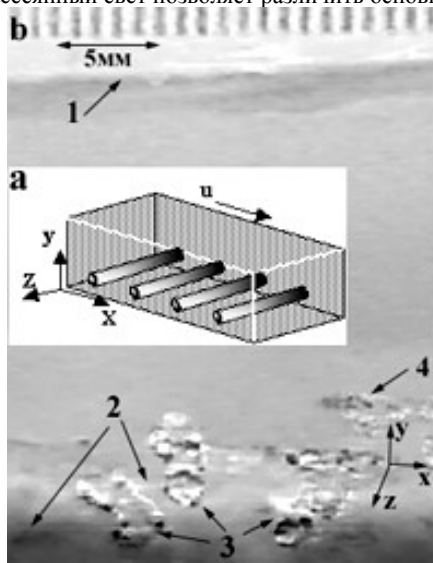


Рис. 3.2 Формирование вихрей у песчаного дна канала. 1 – поверхность воды, 2 – дно канала, 3 – вихри на дне, 4 – вихрь на верхней границе придонного слоя. а – схема, показывающая расположение вихрей в потоке, б – кадр видеозаписи.

§3 НАЧАЛО ФОРМИРОВАНИЯ ГРЯДЫ ВИХРЯМИ

Цилиндрические вихри, ось которых направлена вдоль поперечной координаты z , формируются в придонном слое периодически в одних и тех же местах, если дно канала не размывается. На размываемом дне каждый вихрь будет уносить песчинки, что должно привести к формированию параллельных бороздок, перпендикулярных направлению потока на расстоянии, равном расстоянию между вихрями. Полученные данные позволяют поставить вопрос о прогнозировании размыва дна в потоке с известными характеристиками. Для решения этой задачи необходимо, выяснить, как происходит процесс формирования гряд, и, как зависит перенос донного грунта от параметров вихрей. Приведем данные

экспериментального исследования тормозящихся вдоль по течению стационарных потоков с гладкой свободной поверхностью ($u_{\max} < 23.1$ см/с). Рассматриваются потоки в прямых каналах постоянной ширины с песчаным дном [35].

Исследовано появление гряд на первоначально плоском песчаном дне канала в тормозящемся стационарном потоке воды глубиной $h=1.6$ см, направленном вдоль оси x . Скорость на рабочем участке не превышала 21.9 см/с, число Фруда $Fr=0.56$. В начале эксперимента продольный градиент скорости на поверхности потока $u_x^h = -0.018$ с⁻¹ не менялся вдоль оси x на участке 1 м. На верхней границе придонного слоя δ продольный градиент скорости имел значение $u_x^\delta = -0.012$ с⁻¹.

Вначале на плоском дне образовалась система поперечных (ось z) параллельных канавок. Расстояние между канавками (шаг вдоль оси x) составило 6.9 см, ширина канавки – 2 мм. Кадр видеозаписи приведен ниже.

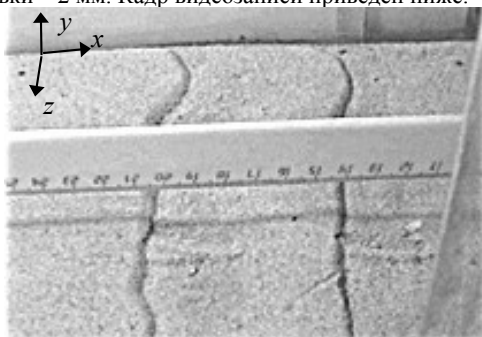


Рис. 3.3 Система параллельных канавок на песке, возникших в зонах вылета вихрей. Направление потока слева направо.

На кадре хорошо видно, что канавки слегка изгибаются вдоль оси z , как и вихри, показанные на рис. 3.2. Видеозапись процесса позволила установить, что начальные канавки образовались в зоне вылета цилиндрических вихрей. Расстояние между вихрями $s = 6.9$ см и интервал между вылетами $T = 2.8$ с соответствуют расчетам по формулам (2.10)–(2.11). Приведем основные параметры, для которых производились расчеты: $u_x^\delta = -0.012$ с⁻¹, $C_f = 0.25$, $u_0 = 2.99$ см/с, $\delta = 0.16$ см. Величины u_0 и δ определялись как функции максимальной скорости потока [10] для песка со средним диаметром песчинки 0.2 мм (рис. 3.4).

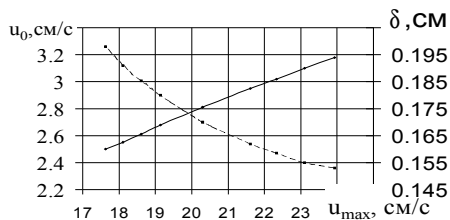


Рис. 3.4 Зависимость u_0 (сплошная линия) и δ (штриховая линия) от максимальной скорости потока для $d=0.2$ мм

Интересно сравнить эти расчеты с расчетами, сделанными по эмпирическим формулам, полученным в других работах. Воспользуемся формулами работ [27], [31]. В первой работе эксперимент проводился в очень близких условиях. Второй эксперимент проводился при значительно более высоком значении продольного градиента скорости течения (расходящийся канал). По эмпирическим формулам, построенным на основе данных работ [27] и [31], расстояние между гребнями гряд равно : $s_{гр} = 150 \cdot d^{0.5} = 68$ мм (работа [27]) и $s_{гр} = 175 \cdot d^{0.75} = 52$ мм (работа [31]). Расстояние между канавками, полученное по формулам первой работы близко расстоянию, зафиксированному в эксперименте. Во втором случае расчет дал заниженный результат. Расхождение связано с тем, что эмпирическая формула получена в потоке с большим продольным градиентом скорости. В соответствии с нашей формулой (2.11), при увеличении модуля продольного градиента скорости, расстояние между точками вылета вихрей (канавками) уменьшается. Этот пример показывает, что большие расхождения результатов расчета по эмпирическим формулам определяется тем, что не учитывается один из важнейших факторов – продольный градиент скорости течения.

По мере углубления канавок между ними росли полосы намытого песка параллельные канавкам. Ширина намытых полосок песка и канавок росла в направлении оси x . Через 22 мин на дне сформировалась система параллельных гряд на расстоянии 6.9 см друг от друга (рис. 3.5). Координаты вершин гребней по оси x соответствовали координатам начальных канавок.



Рис.3.5 Гряды на песке через 22 минуты после начала процесса. 1 – дно, 2 – вода

Рассмотрим подробнее процесс формирования гряды вихрями. Вихри совершали три перелета без видимых потерь песка, а в конце третьего перелета песок высыпался при приземлении. Сравнение расчетных и наблюдаемых траекторий вихря позволяет заключить, что они близки, что возможно, если угловая скорость вращения вихря остается постоянной за время одного перелета. В этом эксперименте для $\omega = 37.5 \text{ с}^{-1}$ первый перелет длится 0.1 с. При приземлении угловая скорость вращения основного вихря уменьшается скачком в 0.7 раз [11]. Первые вихри, формирующие начальную канавку, имели угловую скорость $\omega = 37.5 \text{ с}^{-1}$ и заканчивали третий перелет на расстоянии $x=4.3$ см от канавки. Эта координата соответствует началу зоны намыва песка как следует из данных рис. 3.6(3а). Вихри вылетали с периодом 2.8 с в течение 14 с из одной и той же канавки шириной 2 мм, пока ее глубина не достигла диаметра вихрей $2a = 1.1$ мм. По мере углубления канавки и падения скорости потока угловая скорость вращения формирующихся вихрей убывала. При этом дальность полета вихрей увеличивалась в соответствии с (2.40).

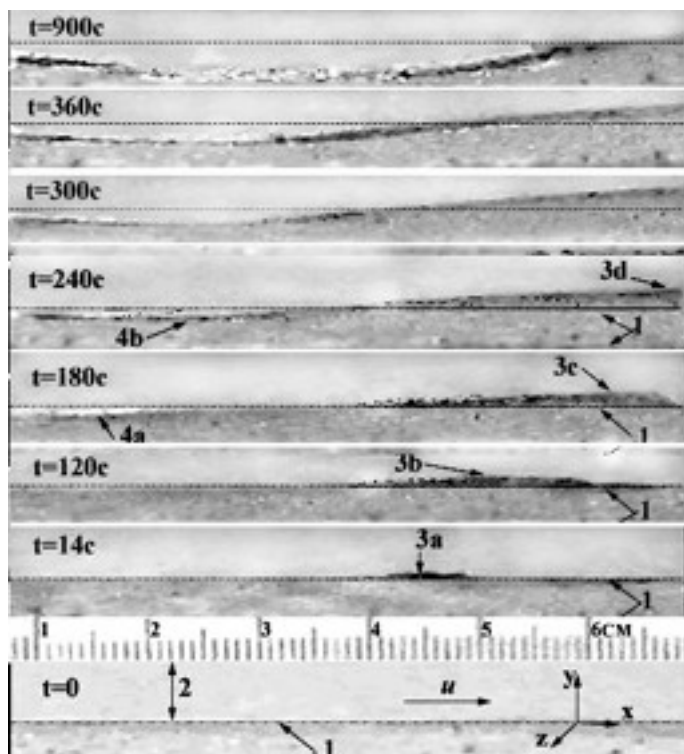


Рис. 3.6 Видеозапись формирования гряды (зона между канавками). 1 – дно, 2 – вода, 3a, b, c, d – насыпь песка на первоначально ровном дне, 4, a, b – размыв дна

Последний вихрь вылетел из канавки глубиной 1.1мм и имел угловую скорость $\omega = 34.1 \text{ с}^{-1}$. Третий перелет он закончил на расстоянии $x = 4.9 \text{ см}$ от канавки, что соответствует расчету по (2.40). Сечение слоя намывтого песка в плоскости xu протяженностью 0.6см, вынесенного из начальной канавки шириной 2мм, можно увидеть на рис. 3.6 (3а). Площадь его сечения соответствует сечению канавки в этот момент времени. Этот факт позволяет заключить, что весь песок вихрь теряет при приземлении в конце третьего перелета. Этот результат требует объяснения.

Выше мы установили, что основной вихрь, вращающийся по часовой стрелке, сворачивается у верхней границы вязкого слоя под действием обратного градиента давления (верхняя граница слоя) и силы трения (нижняя граница). Между основным вихрем и дном в процессе формирования вихря из-за сил вязкости формируются два вихря-спутника, вращающихся в противоположном направлении, компенсируя момент количества движения. Именно эти вихри и захватывают донные частицы, так как формируются в непосредственной близости от дна канала. Тяжелые песчинки устремляются к внешней орбите вихря и там удерживаются обратным градиентом давления. Радиус a основного вихря

превышает радиус вихрей-спутников $a_{\text{сп}}$ в несколько раз: $a = \frac{2}{3}\delta$, $\frac{a}{a_{\text{сп}}} = n = 4 \div 5$.

Наличие маленьких вихрей-спутников практически не меняет движение основного вихря вдоль циклоиды. Одновременно система вихрей вращается вокруг общего центра, расположенного близко к центру основного вихря с угловой скоростью Ω , определяемого выражением (2.34). За время первого перелета вихрей вихри-спутники повернутся вокруг общего центра на угол $\beta = \Omega t_{\text{пер}}$. После приземления угловая скорость основного вихря уменьшается в 0.7 раз. При сохранении циркуляции вихря: $\gamma = -2\omega \pi a^2 = \text{const}$, размер основного вихря

увеличивается: $a_{2\text{пер}} \approx 1.2a$, $a_{3\text{пер}} \approx 1.44a$, а углы поворота вихрей-спутников

вокруг общего центра за первый, второй и третий перелеты составляют:

$$\beta_{1\text{пер}} = 1.15\pi \frac{n(n-1)}{(n+1)^2}, \quad \beta_{2\text{пер}} = 1.2\pi \frac{n(1.2n-1)}{(1.2n+1)^2}, \quad \beta_{3\text{пер}} = 1.28\pi \frac{n(1.44n-1)}{(1.44n+1)^2} \quad (3.5)$$

При $n = 4$ (для данного эксперимента) эти углы равны соответственно: 0.56π , 0.54π , 0.53π . Суммарный поворот за три перелета составляет 1.63π . Видеоизображение системы вихрей в конце третьего перелета приведено на рис. 2.19 и близко расчетному положению. В конце третьего перелета вихри-спутники оказываются между основным вихрем и дном. После косоугольного удара о дно вихри деформируются и теряют песок. Высыпание песка в конце третьего перелета вихря можно увидеть на двух последовательных кадрах видеозаписи (рис. 3.7).

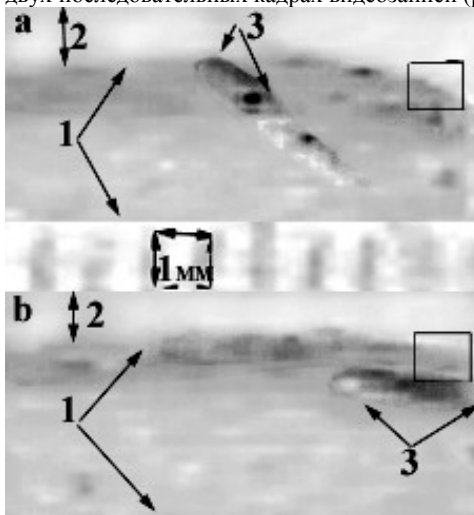


Рис.3.7 Приземление триполя в конце третьего перелета и потеря песка. 1 – дно, 2 – вода, 3 – вихрь. Квадрат имеет одинаковые координаты на двух кадрах, что позволяет заметить изменение уровня песка

На первом кадре вихрь почти закончил третий перелет. Так как скорость вихря близка к нулю, хорошо видны его очертания. На втором кадре центральная

часть вихря уже не видна, так как после удара вихря о дно весь песок высыпался. В результате повысился уровень слоя песка на дне. Квадрат со стороной 1мм, показанный на рисунке, помогает оценить поперечное сечение слоя потерянного вихрем песка: $S_{\text{пес}} = 0.4 \text{ мм}^2$.

Проведенные эксперименты позволили установить, что с увеличением угловой скорости основного вихря (ω определяется скоростью потока и диаметром донной шероховатости) количество песка, переносимого вихрями, увеличивается (рис. 3.8).

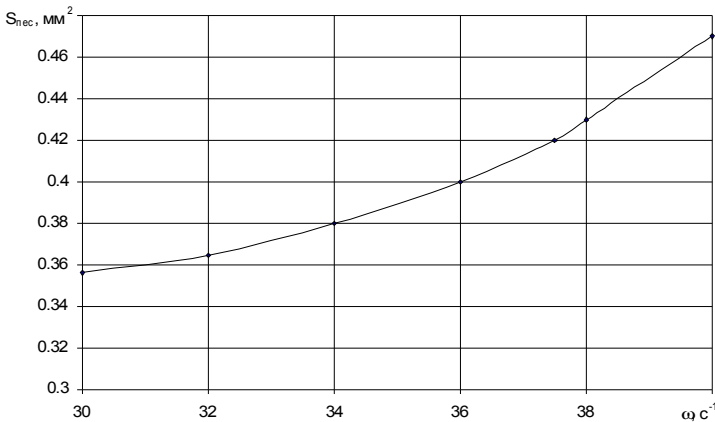


Рис. 3.8 Сечение слоя песка, переносимого поперечным сечением вихря, как функция угловой скорости вращения вихря

Используя полученную зависимость, период вылета вихрей (2.10), дальность перелета вихрей (2.40) можно прогнозировать скорость размыва начальной канавки, место и скорость намыва песка по основным параметрам: скорости и продольному градиенту скорости потока, диаметру донных частиц.

На рис. 3.6 видно, что ширина канавки, равная вначале диаметру вихря, постепенно увеличивается: происходит смыв слоя песка толщиной в диаметр вихря. Как же происходит этот процесс?

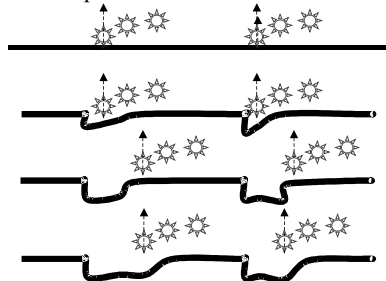


Рис. 3.9 Схема формирования прорези. Значки (солнце) показывают вылет вихрей

Вначале вихри вылетают из одного и того же места, унося с собой песок. Глубина канавки увеличивается. Когда глубина канавки достигала диаметра вихря

1.1мм, зона вылета вихрей смещалась вниз по течению. Рядом с начальной прорезью формируется новая канавка, пока не достигает глубины, равной диаметру вихря. Протяженность канавки постепенно увеличивается, сохраняя глубину. Ниже приведен кадр видеозаписи, на котором виден вихрь, вылетающий со дна канавки. Слева от вихря (поток направлен слева направо) видна сформированная вихрем канавка, толщина которого равна диаметру вихря.

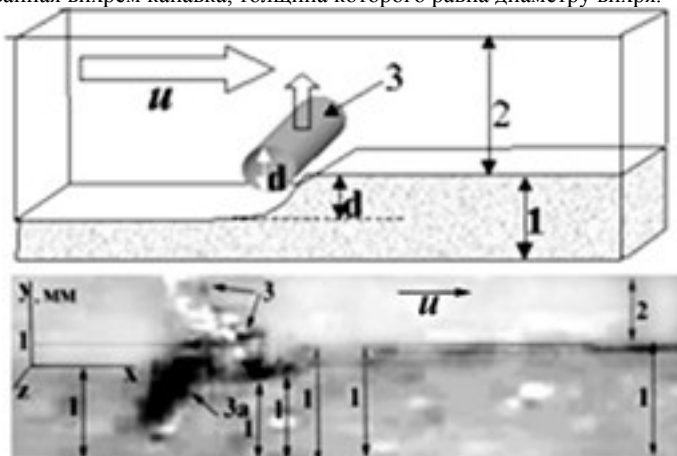


Рис.3.10 Вихрь, поднимающийся со дна песчаной прорези. 1 – песок, 2 – вода, 3 – центральная часть вихря, 3а – концы вихрей у вертикальной стенки

Скорость роста вертикального сечения начальной канавки, расположенного вдоль оси канала, можно определить, как произведение площади поперечного сечения слоя песка, уносимого одним вихрем, на количество вихрей, вылетающих в единицу времени: $S_{\text{пес}}/T$, где T – период вылета вихрей (2.10). Учитывая, что максимальная глубина начальной канавки близка диаметру вихрей, протяженность канавки увеличивается со скоростью:

$$\frac{\Delta l_{\text{кан}}}{\Delta t} = \frac{S_{\text{пес}}}{T2a} \quad (3.6)$$

§4 ВЛИЯНИЕ ДОННЫХ ФОРМ НА ПОТОК

Почему вихри перестают формироваться на дне первоначальной канавки, когда ее глубина достигает диаметра вихря? Это, по-видимому, связано с реакцией потока на деформацию дна канала. Основной вихрь формируется у верхней границы придонного слоя, который имеет фиксированную толщину, превышающую диаметр вихря на его радиус. Пока глубина канавки мала по сравнению с размером придонного слоя, поток ее не замечает. Когда глубина канавки оказывается сравнимой с толщиной придонного слоя, в поле скорости потока над канавкой появляется локальная особенность: скорость потока над узкой канавкой возрастает.

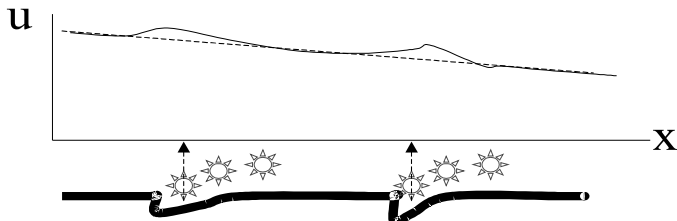


Рис. 3.11 Реакция поля скорости потока на образование начальных канавок

В зоне ускорения потока над канавкой вихрь формироваться не может. В результате, точка отрыва вихря смещается вниз по течению. Схема процесса показана на рис. 3.9.

Почему же над канавкой появляется максимум скорости течения? Численные исследования потоков жидкости в горизонтальных каналах со ступенькой на дне (отношение высоты ступеньки к глубине потока – малая величина) показывает, что при внезапном понижении или повышении дна скорость потока увеличивается в некоторой области за ступенькой. Эксперименты установили, что параметры потока начинают меняться, если высота ступеньки превышает толщину придонного слоя δ . Выше приведена зависимость толщины придонного слоя от максимальной скорости потока при фиксированном размере донных частиц (рис. 2.7). Толщина придонного слоя уменьшается при увеличении скорости потока и увеличивается при увеличении размера донных частиц. Толщина придонного слоя не зависит от продольного градиента скорости. Для гладкого дна существует минимальный размер придонного слоя $\delta=0.14$ см, полученный для потока воды в исследованном интервале значений параметров.

Экспериментальная зависимость безразмерной скорости потока за ступенькой размыта от относительной высоты ступеньки приведена на следующем рисунке. Приведенные данные близки к результатам численного решения нелинейной задачи обтекания потоком ступеньки для близкого числа Фруда $Fr = 0.5$ [36] (сплошная кривая). Линейные решения дают завышенные значения при малых высотах ступеньки и заниженные – при больших высотах.

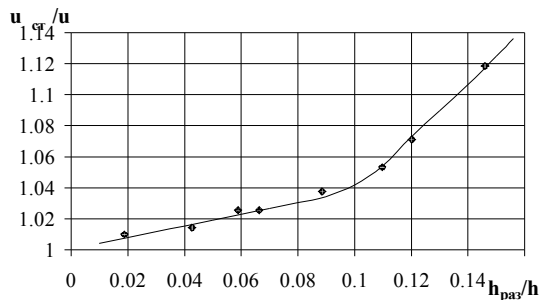


Рис. 3.12 Увеличение скорости над ступенькой на дне. Точки – эксперимент, сплошная линия – численная работа [36].

Соответствие расчетных и экспериментальных данных позволяет заключить, что при малых высотах ступеньки численные методы решения нелинейной задачи позволяют рассчитать поле скорости течения. Заметный рост скорости потока, который можно реально измерить в эксперименте, начинается для высоты ступеньки близкой толщине слоя δ (на рис. 3.12 $h_{\text{рав}}/h = 0.06$). Отношение высоты ступеньки к толщине придонного слоя δ может быть удобным параметром задачи. В этом случае решение будет пригодно для потока любой глубины, в том числе, и для морских придонных течений.

Теперь рассмотрим изменения поля скорости потока, которые вносит насыпь песка. Будем моделировать насыпь наклонным участком дна. Пусть поток течет в прямом горизонтальном канале слева направо. Перед наклонным участком дна происходит торможение течения и повышение уровня воды. Над наклонной плоскостью скорость течения растет в направлении движения, а уровень воды понижается. Схема течения показана на следующем рисунке.

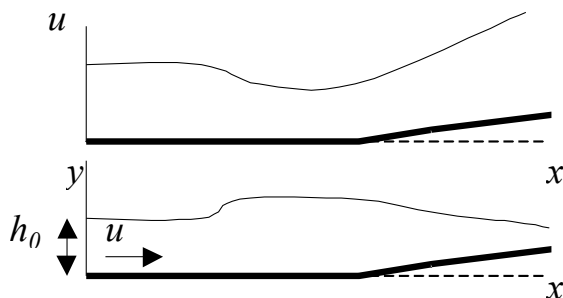
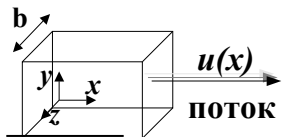


Рис. 3.13 Схема течения жидкости над наклонной плоскостью в прямом канале

Для описания процесса воспользуемся законом сохранения массы и энергии. Наклонная часть дна создает препятствие течению (подпор), в результате уровень жидкости повышается в конце горизонтального участка, а скорость падает. Рассмотрим стационарный поток жидкости в прямом канале с горизонтальным дном. Трением пока пренебрежем, считая поток ламинарным. Так как поток стационарный, то расход жидкости через вертикальное сечение, перпендикулярное направлению движения, сохраняется вдоль всего канала. Если канал прямой, то расход жидкости можно записать в виде:



$$Q = bu(x)h(x) = \text{const} \quad (3.7)$$

Здесь b – ширина канала, h – глубина потока. Если ширина канала постоянна, то произведение скорости на глубину жидкости тоже не меняется вдоль оси x . Таким

образом, для стационарного ламинарного потока жидкости в прямом канале можно записать:

$$uh \Big|_x = \text{const} \quad (3.8)$$

В соответствии с (3.8), скорость потока уменьшается перед препятствием, где скапливается жидкость, и уровень воды поднимается. В этой зоне, в соответствии с законом Бернулли, динамическое давление растет. Под действием градиента давления над наклонной плоскостью скорость потока возрастает, а уровень воды падает.

Потери энергии на трение обычно записывают в виде добавочного повышения уровня жидкости и снижения средней скорости. Схема течения потока через подводную дамбу конечной высоты приведена ниже.

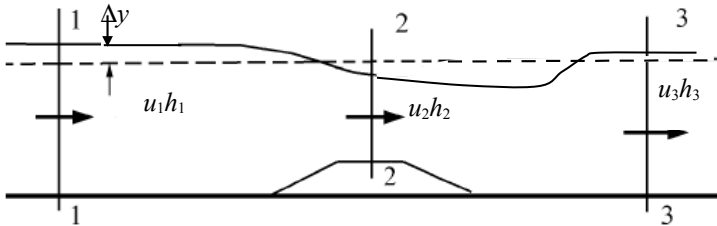


Рис. 3.14 Схема потока, натекающего на дамбу. $u < 23.1$ см/с

Такое течение описать достаточно сложно, и задача решается экспериментально [37]. Запишем уравнение Бернулли для слоя воды в целом для сечений 1 – 3, учитывая потери энергии на дамбе и трение $\Delta h_{1,3}$:

$$y_0 + \Delta y + \frac{u_1^2}{2g} = y_3 + \frac{u_3^2}{2g} + \Delta h_{1,3} \quad (3.9)$$

Здесь y_0 – уровень потока без дамбы. Уровень воды после дамбы уже не возвращается к y_0 из-за потерь на трение.

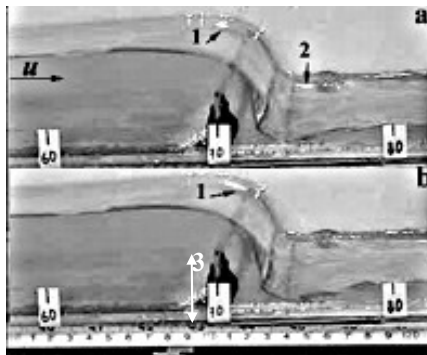


Рис. 3.15 Поток над вертикальной пластиной. 1 – треки белой частицы на поверхности воды над пластиной, 2 – трек частицы на поверхности воды за пластиной, 3 – вертикальная пластина.

При больших углах наклона дна происходит уменьшение скорости течения и над нижней частью наклонного участка. Перед вертикальной стенкой, скорость потока имеет минимум перед самой преградой, а над стенкой получается тонкий слой жидкости, имеющий очень большую скорость течения. Выше на двух последовательных кадрах видеозаписи показан поток воды в прямом канале. На координате $x = 70$ см помещена вертикальная пластина. На приведенных кадрах видны треки дух частиц. Первая частица на верхнем кадре находится в самой верхней точке возвышения уровня воды и имеет минимальную скорость. На нижнем кадре эта частица попадает в область понижения уровня воды над пластинкой. Здесь длина трека резко увеличивается, что обусловлено сужением потока и увеличением скорости частицы. Скорость потока за пластиной очень велика, в чем можно убедиться по длине трека второй частицы.

§5 ФОРМИРОВАНИЕ ЯМЫ МЕЖДУ ГРЕБНЯМИ ГРЯДЫ

В начале процесса формирования гряды образование канавок приводит к локальному изменению поля скорости, а параметры основного потока не меняются. Изменений параметров основного потока становятся заметны, когда ширина канавки на порядок превышает ее глубину ($t=120$ с). К этому времени справа от канавки формируется гряда песка (Рис. 3.6 – 3с). Скорость потока растет над насыпью до значения $u_{ct}=1.022 \cdot u$ и уменьшается на участке между канавкой и насыпью. В зоне торможения течения значение модуля продольного градиента скорости течения $|u_x^\delta| = 0.03 \text{ с}^{-1}$ оказывается выше, чем в начале эксперимента.

В области между канавкой и насыпью увеличение модуля продольного градиента скорости привело к уменьшению периода вылета вихрей $T=1.7$ с, и сокращению расстояния между вихрями $s=3.8$ см. Однако эта величина превышала расстояние от канавки до начала насыпи. Так как над насыпью скорость потока увеличивалась вдоль направления движения, то вихри здесь не образовывались. В результате существовала единственная точка отрыва вихрей на правой границе канавки. Скорость роста канавки увеличилась при сохранении ее глубины (рис.3.6, 4а, 4б).

Если пренебречь понижением скорости потока перед насыпью и предположить, что скорость остается невозмущенной на расстоянии, равном $100h_{ct}$, тогда градиент скорости потока между канавкой и намывом можно оценить по формуле:

$$\frac{\partial u}{\partial x_{ct}} = - \frac{(u_{ct}/u - 1)u_\delta}{100h_{раз}} + u_x^\delta \quad (3.10)$$

Подставим в выражение (3.10) параметры потока для этой фазы формирования гряды. Для $h_{раз} = 0.11$ см, $u_\delta = 5u_0 = 14.5$ см/с, $u_x^\delta = -0.012 \text{ с}^{-1}$ расчетное значение $u_x^\delta|_{ct} = -0.0318 \text{ с}^{-1}$ оказывается близким экспериментальному (-0.03 с^{-1}) значению. Отсюда следует, что основной вклад в увеличение модуля продольного градиента скорости справа от канавки вносит возмущение скорости над ступенькой размыва. Скорость роста протяженности канавки, зафиксированная в эксперименте (рис.3.6, 4а, 4б), соответствует расчету по (3.6) для $T = 1.7$ с и $s = 3.8$ см для нового продольного градиента скорости течения. Этот

этап формирования гряды заканчивается, когда канавка достигает координаты начала намыва песка ($t = 300$ с).

Постепенное повышение дна канала вдоль оси x в результате отложения песка вихрями (рис.3.6) приводит к тому, что скорость течения над намывом либо не меняется вдоль оси x , либо наблюдается слабое увеличение скорости. В этих условиях торможения придонного слоя не происходит, вихри не отрываются, размыв дна не наблюдался ($t < 300$ с).

Ширина насыпи песка постепенно растёт, по мере продвижения зоны размыва вдоль оси x . Это обусловлено смещением вниз по течению точки приземления вихрей в конце третьего перелета. Когда насыпь достигает начала следующей канавки, высота ее гребня $h_{гр}$ равна сумме глубины канавки (0.11 см) и высоте намыва слоя песка (0.2 см). Такая высота насыпи вызывает заметное сопротивление потоку. В результате возникает новая область торможения потока. Она начинается на расстоянии $10 \cdot h_{гр}$ вниз по течению от гребня и захватывает начало насыпи.

В новой зоне торможения продолжается размыв дна вихрями ($t = 300$ с): глубина начальной канавки увеличивается и начинается смыв намыва ранее песка. В этих границах формируется яма, глубина которой постепенно увеличивается (рис.3.6, $t = 360 - 900$ с). Скорость размыва дна соответствует приведенным выше соотношениям для нового распределения скорости вдоль по потоку. Для прогноза размыва теперь необходимо решать нелинейную задачу обтекания потоком воды рельефа дна с конечным перепадом высот [36]. Скорость потока в этой зоне заметно снижается, а уровень воды повышается. Изменение уровня воды при формировании ямы можно видеть на следующих кадрах видеозаписи. Форма ямы подчеркивается теневой линией, проходящей вдоль продольной оси канала.

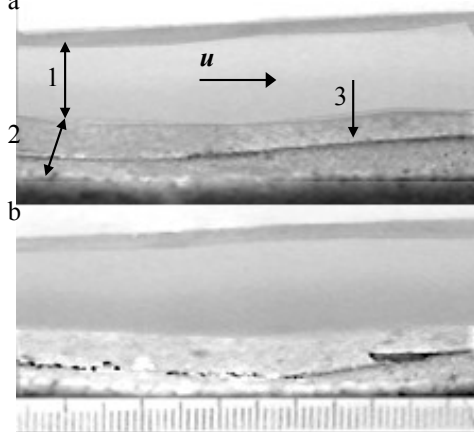


Рис. 3. 16 Изменение глубины потока при формировании ямы. (а – через 5 минут после начала формирования гряд, б – через 21 минуту. 1 – вода, 2 – дно, 3 – теневая линия вдоль оси канала.

На первом кадре, сделанном через 5 минут после начала формирования гряд, начальная канавка достигла начала насыпи песка. На втором кадре (21 мин) часть

насыпи уже смыта. В зоне максимального размыва (самая низкая точка теневой линии) глубина потока максимальна.

Процесс формирования ямы остается таким же, как и способ формирования начальной канавки. В начале зоны торможения формируются вихри, образующие прорезь глубиной, равной диаметру вихря. Затем точка отрыва вихрей смещается вниз по течению. Расстояние между соседними вихрями превышает ширину зоны торможения потока, поэтому вихри отрываются только в одной точке на левом краю зоны торможения.

§6 ПРОВЕРКА МОДЕЛИ В НАТУРНЫХ УСЛОВИЯХ

Проверка приведенной выше модели формирования гряд потоком, скорость которого не превышает 23.1 см/с, проводилась в натуральных условиях на реках [10] и в шельфовой зоне Черного моря [35]. Были проведены исследования поля скорости на реках с дном из песка и гравия. Максимальный размер зерна гравия составил $d=1.2$ см. Зависимости толщины придонного слоя и придонной скорости для гравия максимального размера приведены на следующем рисунке.



Рис. 3.17 Зависимость толщины придонного слоя (сплошная линия) и придонной скорости (пунктир) от максимальной скорости потока в русле из гравия $d=1.2$ см

Все измерения проводились в потоках, глубина которых не превышала 1.5 м. Форма дна определялась с помощью эхолота или линейки. Скорость течения определялась с помощью вертушки и по смещению частиц нейтральной плавучести.

Исследования на песчаном морском дне проводились на глубине $h=60$ м вблизи Балаклавы. Процесс формирования гряд снимался на видеокамеру на плоской площадке, выровненной предварительно. Скорость придонного потока определялась по смещению частиц нейтральной плавучести на видеозаписи.

В результате измерений получены следующие параметры: $u=20$ см/с, $d=0.4$ см, $u_x^\delta = -0.008$ с⁻¹. Расчеты, выполненные в соответствии с (2.10), позволяют найти расстояние между грядами: $s=9$ см. Этот результат согласуется с визуальными наблюдениями (рис. 3.18).

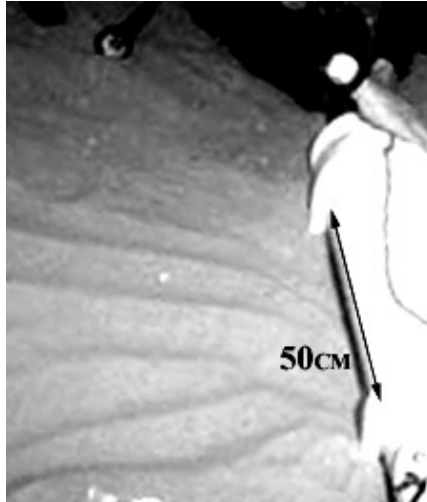


Рис. 3.18 Гряды на песчаном дне моря на глубине 60 м

Полученные соотношения могут применяться для любых прямых стационарных потоков, скорость которых не превышает 23.1 см/с, если известно распределение скорости вдоль по течению и по вертикали в придонном слое, где скорость течения является линейной функцией вертикальной координаты. Верхний предел действия модели связан с тем, что при этой скорости потока на свободной поверхности воды образуются волны с "неподвижными" гребнями. Эти волны играют исключительно важную роль в формировании русла рек. Это явление будет изучено в следующей главе.