

ФИЗИКА ЗЕМЛИ, АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ

Захват крупных частиц грунта вихрями в потоках, возникающих при прорыве плотиныО. Н. Мельникова^a, В. Н. Семенюк^b*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физики моря и вод суши. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.**E-mail: ^aolamel@yandex.ru, ^bvl.semenyuk@gmail.com*

Статья поступила 27.04.2010, подписана в печать 15.07.2010

На основе экспериментального исследования придонного слоя головной части потоков, возникающих при прорыве плотины, показано, что толщина вязкого слоя превышает диаметр донной частицы d_p , растет с увеличением d_p и уменьшается при увеличении скорости потока ($d_p < 1.2$ см). Донные частицы захватываются вихрями-спутниками, возникающими под основными вихрями, периодически формирующимися в вязком слое при замедлении течения в направлении движения. Если $d_p > 0.045$ см, диаметр вихрями-спутника меньше d_p . Вихри-спутники сближаются и сливаются в один вихрь, способный вместить донную частицу, если скорость потока достигает критического значения скорости $U_{дip}$. Захват частицы происходит при более высокой скорости течения $U_{cr} > U_{дip}$, которая обеспечивает вращение частицы без проскальзывания.

Ключевые слова: прорыв дамбы, пограничный слой, взаимодействие вихрей, перенос грунта.

УДК: 551.465:556.536. PACS: 92.40.Cy, 92.40.Gc, 92.40.Na, 47.32.cb.

Введение

При прорыве искусственной или естественной плотины возникает поток, бегущий по сухому руслу. Крутой передний фронт часто называют «стеной воды». В ряде натуральных наблюдений [1, 2] установлено, что основная часть крупного грунта переносится в голове волны [3], впервые экспериментально исследованной в работе [4]. Авторы заключили, что головная волна обрушается, образуются струи. В работе [5] установлено, что на переднем фронте волны образуются сложные вихревые структуры. В работе [6] показано, что крупные тяжелые частицы могут переноситься вихрями близкого размера, если плотность частиц выше плотности воды примерно в два раза. Для создания метода прогноза размыва грунта необходимо знать, при каких условиях формируются вихри, способные захватить крупный грунт. Решению этой задачи посвящена настоящая работа.

Аппаратура и методика исследования

Эксперименты проводились в прямом горизонтальном канале длиной 3.5 м, шириной 20 см с прозрачными стенками. Резервуар, отделенный от канала заслонкой, заполнялся водой. После открытия заслонки (время подъема около 0.04 с) возникал поток (скорость до 2 м/с), который снимался на видеокамеру. Уровень воды в резервуаре составлял $h = 27$ см. Высота подъема заслонки 7 см. Поток снимался неподвижной камерой и камерой, которая перемещалась вдоль потока со скоростью головной волны. Камера перемещалась на специальной тележке вдоль гладкого пластикового рельса. Съемка велась удаленной камерой и крупным планом. Для определения скорости потока использовались частицы нейтральной плавучести из полистирола.

На дно канала был уложен слой калиброванных частиц со средним диаметром 0.023, 0.12, 0.4, 0.8 и 1.2 см, толщина слоя 4 см.

Образование вихрей и захват частиц

При прорыве плотины на переднем фронте потока образуются большие вихри с диаметром, близким глубине потока. В области торможения потока под большими вихрями в вязком слое толщиной δ , в котором скорость течения $u = u_0 + \chi y$ является линейной функцией вертикальной координаты y ($\chi = \text{const}$, u_0 — придонная скорость), формируются цилиндрические вихри диаметром $d \approx 2\delta/3$ [7]. Между основными вихрями и дном возникают вихри-спутники меньшего диаметра d_{sp} . Эти вихри вращаются в одном направлении и сливаются, если оказываются достаточно близко друг к другу при условии [7]

$$\frac{d}{d_{sp}} < 3. \quad (1)$$

После слияния новый вихрь может захватить более крупные частицы. В ряде экспериментов была получена зависимость толщины вязкого слоя δ от максимальной скорости потока на поверхности воды u_{max} для частиц диаметром $d_p \approx 0.23, 0.12, 0.4, 0.8$ и 1.2 см (рис. 1). Толщина вязкого слоя уменьшается с ростом скорости течения, достигая минимального значения δ_{min} , и не меняется при дальнейшем увеличении скорости. Толщина минимального слоя растет с увеличением диаметра частиц, превышая его примерно на треть. Для этого отношения d/d_{sp} удовлетворяет условию слияния вихрей (1) (таблица) для всех размеров частиц. Для $d_p > 0.2$ см это отношение достигает минимального значения $d/d_{sp} = 2$, при слиянии вихрей-спутников размер нового вихря оказывается близким размеру

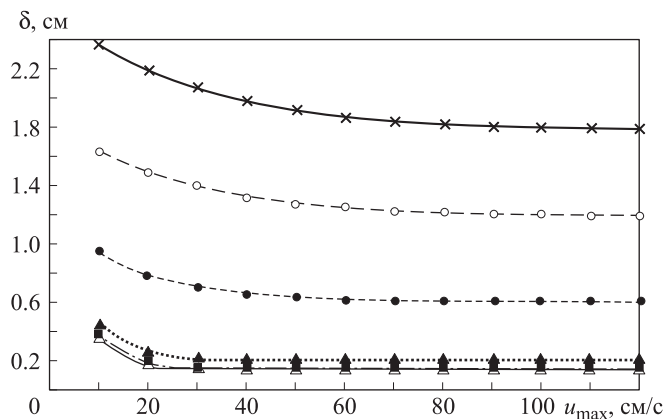


Рис. 1. Зависимость толщины вязкого слоя δ от максимальной скорости потока u_{\max} для гладкого дна (тонкая сплошная линия тренда), для частиц диаметром 0.023 см (штрихпунктирная линия тренда), 0.12 см (пунктирная линия тренда), 0.4 см (тонкая штриховая линия тренда), 0.8 см (жирная штриховая линия тренда) и 1.2 см (жирная сплошная линия тренда)

Зависимость толщины вязкого слоя и отношения диаметров основного вихря и вихрей-спутников от диаметра частиц грунта

d_p , см	δ_{\min} , см	d/d_{sp}
0	0.14	2.6
0.023	0.14	2.4
0.12	0.2	2.1
0.4	0.6	2
0.8	1.2	2
1.2	1.8	2

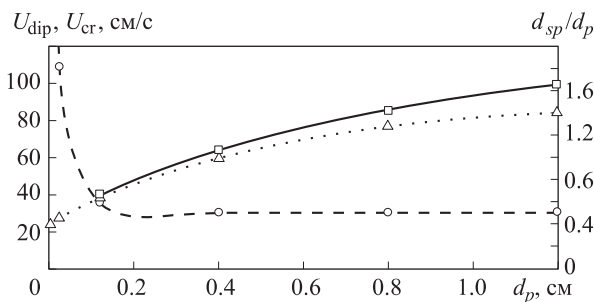


Рис. 2. Зависимости отношения d_{sp}/d_p (штриховая линия тренда), критической скорости течения для формирования диполей U_{dip} (пунктирная линия тренда) и критической скорости течения U_{cr} , при котором начался захват крупных частиц грунта (сплошная линия тренда), от диаметра донных частиц

основного вихря. Они представляют собой пару вихрей, вращающихся в противоположном направлении. Пара поднимается вверх, достигая поверхности воды. Для $d_p < 0.2$ см слившийся вихрь-спутник меньше основного, возникающий диполь перемещается по дугообразной траектории из-за вращения системы вихрей.

На рис. 2 приведена зависимость d_{sp}/d_p от размера частицы. Пока $d_{sp}/d_p < 1$ (для $d_p < 0.05$ см) — частицы могут быть захвачены одним вихрем-спутником. Для

захвата частиц большего диаметра необходимо, чтобы произошло слияние вихрей-спутников. Минимальное значение отношения $d_{sp}/d_p = 0.5$ для $d_p > 0.2$ см. В этом случае диаметр вихря, возникающего при слиянии вихрей-спутников, близок диаметру частицы грунта. Это обеспечивает возможность захвата частицы диполем, если скорость потока превышает критическое значение U_{dip} , при котором диполи формируются. Зависимость $U_{dip}(d_p)$ определена в ряде экспериментов (рис. 2). Сможет ли вихрь при выполнении условия формирования диполя удержать крупную частицу?

В [6] показано, что вихри могут удерживать такие частицы, если их плотность превышает плотность воды примерно в 2 раза, а частицы вращаются без проскальзывания. Для того, чтобы частица вращалась в вихре без проскальзывания, нужна достаточно большая скорость вращения вихря-спутника ω_{sp} . В соответствии с [7]

$$\omega_{sp} = \frac{d}{d_{sp}} \frac{2u_0}{\delta} \quad (2)$$

Когда толщина вязкого слоя достигает минимального значения δ_{\min} , отношение диаметров вихрей фиксировано. Это значит, что угловая скорость вращения вихря определяет только придонная скорость u_0 . Экспериментальные данные показали, что в диапазоне значений скорости, для которого $\delta = \delta_{\min}$, $u_0 \approx u_{\max}/10$. Учитывая (2), получаем

$$\omega_{sp} = 0.2 \frac{d}{d_{sp}} \frac{u_{\max}}{\delta_{\min}} \quad (3)$$

Следовательно, ω_{sp} определяется только скоростью течения на поверхности потока. В серии экспериментов была определена зависимость критического значения этого параметра U_{cr} , при котором начинался захват крупных частиц грунта, от размера частиц ($d_p > 0.045$ см) (рис. 2). Захват и вынос крупных частиц грунта (0.2 × 0.4 см) вихрями показан на рис. 3. Частица располагается длинной стороной вдоль оси вихря. Оказалось, что $U_{cr} > U_{dip}$. Отличие возрастает с увеличением диаметра частиц.

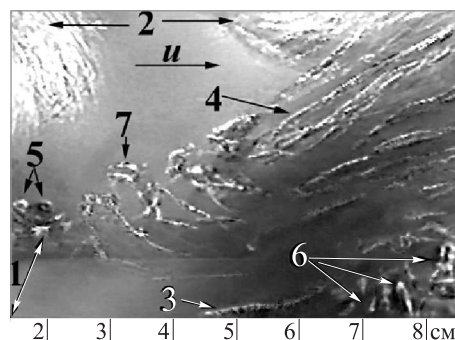


Рис. 3. Придонный слой потока в голове волны прорыва: 1 — дно канала, очищенное от щебня; 2 — большие вихревые жгуты; 3 — вихри, сформированные в вязком слое потока над щебнем; 4 — вихри, поднявшиеся вверх; 5 — вихревой диполь, сформированный над щебнем $d = 0.4$ мм; 6 — вертикальные концы вихрей с захваченным щебнем; 7 — вихревой диполь, сформированный над гладким дном $d = 0.15$ мм

Заклучение

На основе экспериментального исследования придонного слоя головной части потоков, возникающих при прорыве плотины, показано, что толщина вязкого слоя превышает диаметр донной частицы d_p , растет с увеличением d_p и уменьшается при увеличении скорости потока ($d_p < 1.2$ см). Донные частицы захватываются вихрями-спутниками, возникающими под основными вихрями, периодически формирующимися в вязком слое при замедлении течения в направлении движения. Если $d_p > 0.045$ см, диаметр вихря-спутника меньше d_p . Вихри-спутники сближаются и сливаются в один вихрь, способный вместить донную частицу, если скорость потока достигает критического значения скорости U_{dip} . Захват частицы происходит при более высокой скорости течения $U_{cr} > U_{dip}$. Можно предположить, что при этом

значении скорости частица начинает вращаться в вихре без проскальзывания, и вихрь может ее удержать.

Список литературы

1. *Ancey C.* // Geomorphologic Fluid Mechanics / Ed. by N. J. Balmforth, A. Provenzale. Berlin, 2001. P. 528.
2. *Capart H., Young D.L.* // J. Fluid Mech. 1998. **372**. P. 165.
3. *Khan A.A., Steffler P.M., Gerard R.* // J. Hyd. Engrg. 2000. ASCE. **126**, N 5. P. 375.
4. *Stansby P.K., Chegini A., Barnes T.C.D.* // J. Fluid Mech. 1998. **374**. P. 407.
5. *Мельникова О.Н.* // Изв. АН. Физика атмосферы и океана. 2008. **44**. № 2. С. 266.
6. *Мельникова О.Н.* // Изв. АН. Сер. физ. 2008. № 12. С. 1793.
7. *Мельникова О.Н.* Динамика руслового потока. М., 2006.

The capture of large bottom particles by eddies in a dam break flow

O. N. Melnikova^a, V. N. Semenyuk^b

Department of Marine and Inland Water Physics, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.

E-mail: ^aolamel@yandex.ru, ^bvl.semenyuk@gmail.com.

On base of an experimental study of a boundary layer of a head of a dam break flow it is shown that a thickness of a viscous layer exceeds a bottom particle diameter d_p , increases with d_p and decreases with a flow velocity (for $d_p < 1.2$ cm). Bottom particles are captured by satellite eddy which originate from mane eddies near the bottom. Mane eddies are periodically appearing in the viscous layer if the flow decelerates downstream. If $d_p > 0.045$ cm the satellite diameter is smaller than d_p . Satellites close in and run into one eddy which can contain the bottom particle if the flow velocity achieves a critical value U_{dip} . Particles can be captured when the flow velocity has higher value $U_{cr} > U_{dip}$. It is possible under this condition the particle starts to rotate in the satellite without a slippage.

Keywords: dam break flow, erosion, Vortex interactions, sediment transport.

PACS: 92.40.Cy, 92.40.Gc, 92.40.Ha, 47.32.cb.

Received 24 April 2010.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 6(2010).

Сведения об авторах

1. Мельникова Ольга Николаевна — докт. физ.-мат. наук, доцент, доцент; тел.: (495) 939-10-46, e-mail: olamel@yandex.ru.
2. Семенюк Владимир Николаевич — аспирант; e-mail: vl.semenyuk@gmail.com.