

Рис. 4. Сопоставление рассчитанных значений глубины протаивания (по Стефану) и экспедиционных данных

В дальнейшем на основе данных станции о. Самойловского планируется разработка метода расчета мощности протаивания/промерзания с учетом современных данных и недостатков используемых моделей.

Литература

1. Аржанов М. М., Елисеев А. В., Демченко П. Ф., Мохов И. И. Моделирование изменений температурного и гидрологического режимов приповерхностной мерзлоты с использованием климатических данных (реанализа) // Криосфера Земли. 2008. Т. XI, № 4. С. 65–69.
2. Дугарцыренов А. В., Бельченко Е. Л. О динамике промерзания (оттаивания) массивов горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) № 3. М., 2009. С. 48–52.
3. Ершов Э. Д. Общая геокриология. М., 1990. 559 с.
4. Федорова И. В., Большианов Д. Ю., Макаров А. С. и др. Современное гидрологическое состояние дельты р. Лены // Система моря Лаптевых и прилегающих морей Арктики: современное состояние и история развития / Под ред. Х. Кассенс, А. П. Лисицына, Й. Тиде и др. М., 2009.
5. Hubberten H.-W., Wagner D., Pfeiffer E.-M. et al. The Russian-German Research Station Samoylov, Lena Delta // A Key Site for Polar Research in the Siberian Arctic. Polarforschung. 2003. 73 (2/3). P. 111–113.

ПРОЦЕССЫ ЗАХВАТА КРУПНЫХ ДОННЫХ ЧАСТИЦ ВИХРЯМИ В ПОТОКАХ ПРОРЫВА ПЛОТИНЫ

В. Н. Семенюк

Московский государственный университет

Экспериментально исследован придонный слой волны прорыва. Показано, что толщина вязкого слоя превышает диаметр донной частицы ($d_p < 1,2$ см). Мелкие частицы, $d_p < 0,045$ см, захватываются вихрями-спутниками, возникающими под основными вихрями, периодически формирующимися в вязком слое. Два вихря-спутника сближаются и сливаются в один вихрь, способный вместить большую частицу, если скорость потока выше критического значения U_{dip} . Захват частицы происходит при большем значении $U_{cr} > U_{dip}$, которое обеспечивает вращение частицы без проскальзывания.

Введение

При прорыве искусственной или естественной плотины возникает поток, бегущий по сухому руслу. Крутой передний фронт часто называют «стеной воды». В ряде натуральных наблюдений [5, 6] установлено, что основная часть крупного грунта переносится в голове волны [7], впервые экспериментально исследованной в [8]. Авторы заключили, что головная волна обрушается, образуются струи. В [2] установлено, что на переднем фронте волны образуются сложные вихревые структуры. В [3] показано, что крупные тяжелые частицы могут переноситься вихрями близкого размера, если плотность частиц выше плотности воды примерно в два раза. Для создания метода прогноза деформации и переноса грунта необходимо знать, при каких условиях формируются вихри, способные захватить крупные частицы. Эта проблема актуальна и при прогнозе смыва грунта ливневыми и паводковыми стоками. Решению этой задачи посвящена настоящая работа.

Аппаратура и методика измерений

Эксперименты проводились в прямом горизонтальном канале длиной 3,5 м, шириной 20 см с прозрачными стенками. Резервуар высотой 27 см, закрытый заслонкой, заполнялся водой. После открытия заслонки на высоту 7 см (время подъема около 0,04 с) возникал поток (скорость до 2 м/с), который снимался на видеокамеру. Поток снимался неподвижной камерой и камерой, которая перемещалась вдоль канала по гладкому пластиковому рельсу со скоростью головной волны. Для определения скорости потока использовались частицы нейтральной плавучести из полистирола. Скорость определялась по длине трека на кадре, доверительный интервал $0,1 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$ для вероятности 0,67. На дно канала укладывался слой калиброванных частиц плотности $2,1 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$ с средним диаметром 0,023, 0,12, 0,4, 0,8 и 1,2 см, толщина слоя – 4 см. Часть экспериментов выполнялась на гладком дне из органического стекла.

Характеристики вязкого слоя и вихрей

При прорыве плотины на переднем фронте потока образуются большие вихри с диаметром, близким глубине потока. В области торможения потока под большими вихрями в вязком придонном 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 $d \approx 2\delta/3$ [1]. Между основными вихрями и дном возникают два вихря-спутника меньшего диаметра d_{sp} , вращающиеся в направлении, противоположном основному вихрю. Спутники сливаются, если оказываются достаточно близко друг к другу при условии [1]:

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

Вихри сливаются у дна канала и могут захватить более крупные частицы. Прогноз захвата частиц вихрями требует определения условий формирования разного типа вихрей в зависимости от параметров течения и размера частиц грунта. В ряде экспериментов были исследованы характеристики вязкого слоя и вихрей, образующихся в нем, как функции скорости потока и размера частиц. Получена зависимость толщины вязкого слоя δ от максимальной скорости потока на поверхности воды u для частиц диаметром $d_p \approx 0,023, 0,12, 0,4, 0,8$ и 1,2 см (рис. 1). Толщина вязкого слоя уменьшается с ростом скорости течения, достигая минимального значения δ_{min} при скорости U_{cr} . При $U > U_{cr}$ толщина слоя и диаметр вихрей, образующихся в нем, остаются постоянными. Минимальная толщина вязкого слоя превышает диаметр частиц в исследованном диапазоне изменения d_p (табл.).

Параметры вихрей и поля скорости как функции диаметра донной частицы

| d_p , см | δ_{min} , см | d/d_{sp} ($\delta = \delta_{min}$) | d_{sp}/d_p ($\delta = \delta_{min}$) | U_{dip} , см·с ⁻¹ | U_{cr} , см·с ⁻¹ |
|------------|---------------------|---|---|-----------------------------------|----------------------------------|
| 0 | 0,14 | 2,6 | 5,0 | 23,1 | 23,1 |
| 0,023 | 0,14 | 2,4 | 1,8 | 27,5 | 28 |
| 0,120 | 0,21 | 2,1 | 0,6 | 38,0 | 40 |
| 0,40 | 0,60 | 2,0 | 0,5 | 60,0 | 64 |
| 0,80 | 1,20 | 2,0 | 0,5 | 76,5 | 85 |
| 1,20 | 1,80 | 2,0 | 0,5 | 85,0 | 100 |

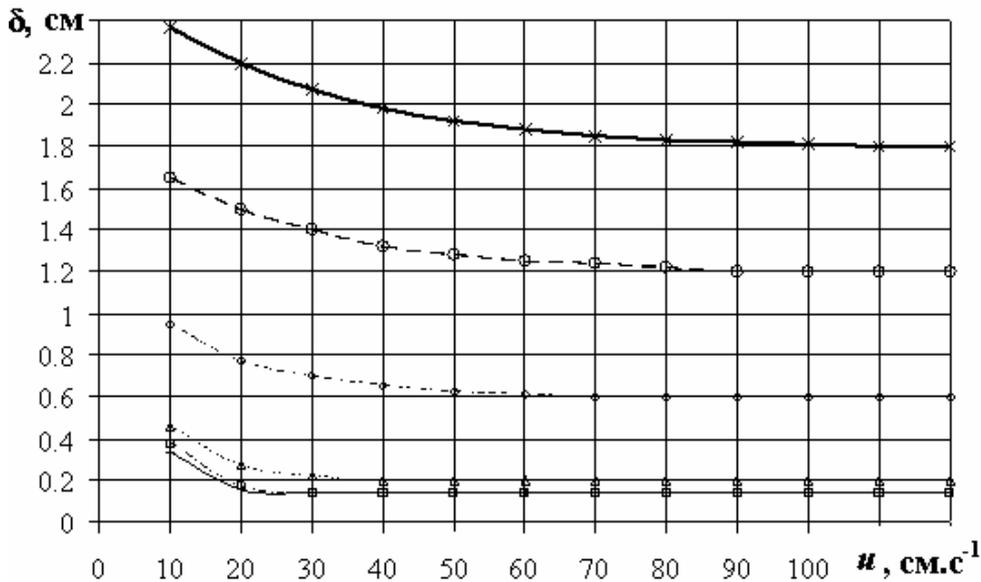


Рис. 1. Зависимость толщины вязкого слоя δ от максимальной скорости потока u для гладкого дна (тонкая сплошная линия тренда), для частиц диаметром 0,023 см (штрихпунктирная линия тренда), 0,12 см (пунктирная линия тренда), 0,4 см (тонкая штриховая линия тренда), 0,8 см (жирная штриховая линия тренда) и 1,2 см (жирная сплошная линия тренда)

Когда толщина вязкого слоя минимальна ($\delta = \delta_{min}$), отношение d/d_{sp} удовлетворяет условию слияния вихрей (1) для всех размеров донных частиц (табл.). Для $d_p > 0,2$ см это отношение достигает минимального значения $d/d_{sp} = 2$. При слиянии двух вихрей-спутников диаметр получившегося вихря оказывается близким размеру основного вихря. Центры вихрей оказываются на одном горизонте, пара вихрей (цилиндры вытянуты вдоль горизонтальной поперечной оси координат) поднимается к поверхности воды. На рис. 2 показана пара вихрей (2), образованная над гравием 2×4 мм при скорости потока $u = 2$ м·с⁻¹. Справа видны вихревые диполи (3), образованные над гладким дном из органического стекла. Диаметр вихрей в диполе неодинаковый, в результате вихри вращаются вокруг общего центра, что приводит к искривлению траектории движения. Концы вихрей вблизи вертикальной стенки канала отстают от центральной части диполя. Они вытягиваются, уменьшаясь в диаметре, скользят по дну, показывая траекторию перемещения центральной части (4). Видно, что у дна вихри смещались вверх по течению, что возможно, если ось основного вихря в момент формирования в вязком слое расположена выше, чем ось вихря-спутника. Эти вихри достигают поверхности воды только в том случае, если глубина потока меньше максимальной высоты подъема вихря. На рис. 3, а приведен кадр, полученный после прохода головной волны. Слева дно очищено от

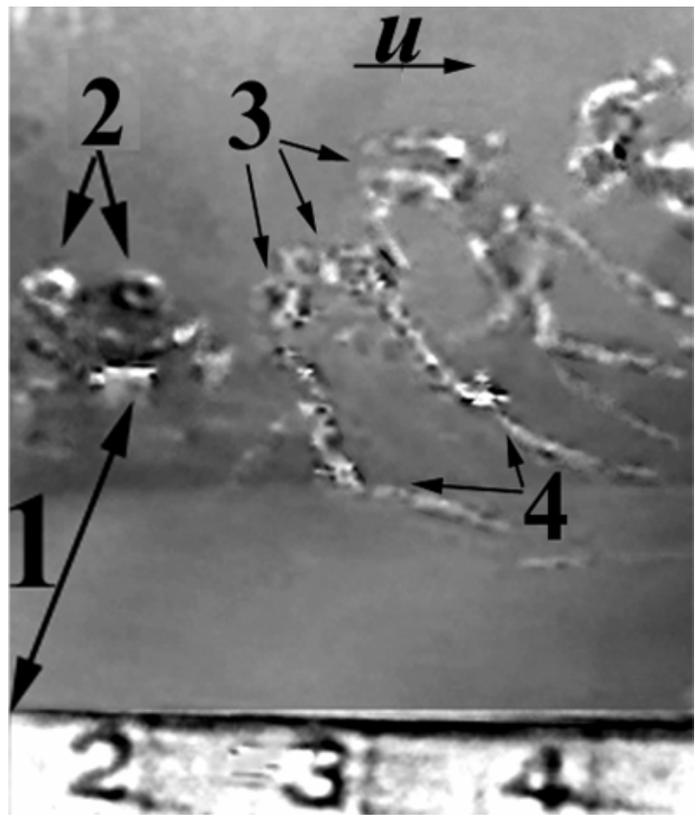


Рис. 2. Диполи, образованные над гравием (2) и над гладким дном (3); 1 – дно канала, 4 – концы вихрей у передней стенки канала

гравия, справа лежит гравий, потерянный распавшимися вихрями. На мелкой воде слева видны вихри, образованные над гладким дном и вылетевшие в воздух (4). Вихри высоко поднимаются над поверхностью воды. Судя по направлению концов вихрей у передней стенки канала, на границе вода – воздух направление движения диполя перпендикулярно свободной поверхности воды, что возможно, если оба вихря оказываются на поверхности одновременно. Из-за разности плотности сред на диполь действует сила градиента давления, направленная из воды в воздух [4]. Справа над глубокой частью волны подъема вихрей в воздух не наблюдается, а концы вихрей у передней стенки канала направлены к поверхности воды по касательной. В этом случае у поверхности воды находится маленький вихрь, а большой основной – под ним. При таком расположении диполя сила, направленная из воды в воздух, минимальна. На рис. 3, б крупно показана поверхность глубоководной части волны. К поверхности воды по касательной подошли вихри (3), вышли на поверхность, но не поднялись над поверхностью воды.

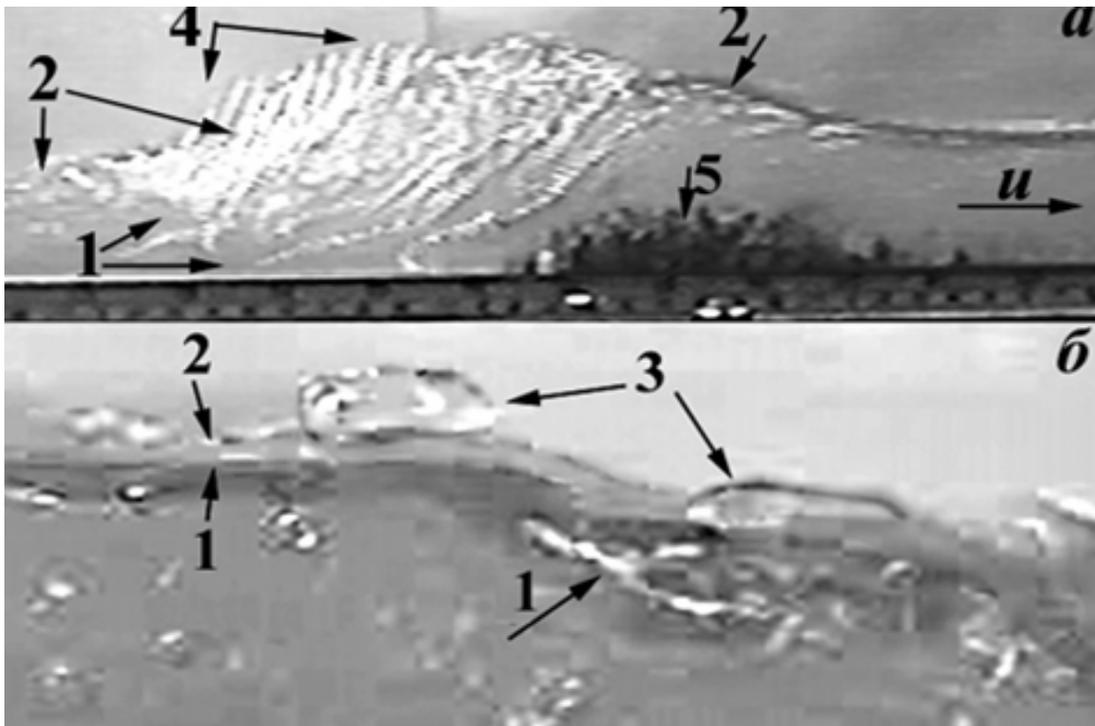


Рис. 3. Волна после прохода головной части и распада вихревого жгута:

1 – концы вихрей у передней стенки канала, 2 – поверхность воды, 3 – вихри, образованные под глубокой частью волны, 4 – вихри, образованные под мелкой частью волны и выброшенные в воздух, 5 – грунт, высыпаемый распавшимся вихревым жгутом

Условия захвата крупных донных частиц вихрями

Для того чтобы вихрь-спутник, образующийся под основным вихрем непосредственно у дна канала, мог захватить донную частицу, его диаметр должен быть не меньше диаметра частицы дна. При $u > U_{cr}$ толщина вязкого слоя минимальна ($\delta = \delta_{min}$), а вихри имеют минимальный размер. Для этих условий экспериментально была получена зависимость отношения диаметра вихря-спутника к диаметру частиц грунта d_{sp}/d_p от размера частицы (табл.). Обнаружено, что для мелких частиц с диаметром $d_p < 0,05$ см отношение $d_{sp}/d_p \geq 1$, такие донные частицы могут поместиться в один вихрь-спутник.

Для захвата крупных частиц $d_p > 0,05$ см необходимо, чтобы произошло слияние вихрей-спутников. Минимальное полученное 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. Таким образом, слияние вихрей-спутников, приводящее к формированию диполя, является необходимым условием захвата крупного грунта $0,05 \text{ см} < d_p < 1,2 \text{ см}$ (исследованный диапазон размера частиц). В ряде экспериментов была получена зависимость скорости потока U_{dip} , при которой

вихри-спутники сливаются (формируется диполь), от диаметра донных частиц (табл.). Является ли условия слияния вихрей-спутников $u > U_{dip}$ достаточным для того, чтобы вихрь мог захватить и унести крупную частицу?

В [3] показано, что вихри могут удерживать крупные частицы, если их плотность превышает плотность воды не более чем в 2,1 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 [1]:

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

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

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

Следовательно, ω_{sp} определяется только скоростью течения на поверхности потока. В серии экспериментов установлены критические значения скорости, при которых начинался захват крупных частиц грунта при указанном выше соотношении плотности частиц и воды. Эти значения скорости близки значениям U_{cr} , при которых вязкий слой достигает минимальной толщины (табл.). Для всех размеров частиц $U_{cr} > U_{dip}$. Отличие возрастает с увеличением диаметра частиц. Можно предположить, что при увеличении плотности донных частиц значение U_{cr} будет возрастать.

Заключение

На основе экспериментального исследования придонного слоя головной части волны, возникающей при прорыве плотины, показано, что толщина вязкого слоя превышает диаметр донных частиц, растет с увеличением d_p и уменьшается при увеличении скорости потока. В вязком слое периодически формируются основные вихри и под ними вихри-спутники. Над мелким грунтом ($d_p < 0,05$ см) диаметр вихрей-спутников больше диаметра донных частиц. Если $d_p > 0,05$ см, диаметр вихря-спутника меньше d_p . При увеличении скорости потока $u > U_{dip}$ и уменьшении толщины вязкого слоя вихри-спутники сближаются и сливаются в один вихрь, способный вместить крупную частицу. Захват частицы происходит при более высокой скорости течения $U_{cr} > U_{dip}$, при которой частица начинает вращаться в вихре без проскальзывания.

Литература

1. Мельникова О. Н. Динамика руслового потока. М., 2006. 139 с.
2. Мельникова О. Н. Вихри в волне, бегущей по сухому грунту // Изв. АН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44, № 2. С. 266.
3. Мельникова О. Н. Захват гравия головной волной, возникающей при прорыве плотины в сухом русле // Изв. АН. Сер. Физическая. 2008. № 12. С. 1793.
4. Мельникова О. Н., Семенюк В. Н. Структура головной волны в сухом русле после прорыва плотины // Известия РАН. Сер. Физическая. 2006. № 12. С. 1700–1703.
5. Ancey C. Debris Flows and Related Phenomena // Geomorphologic Fluid Mechanics / Eds.: N. J. Balmforth, A. Provenzale. Berlin, 2001. P. 528.
6. Capart H., Young D. L. Formation of a jump by the dam-break wave over a granular bed // J. of Fluid Mech. 1998. V. 372. P. 165.
7. Khan A. A., Steffler P. M., Gerard R. Dam-Break Surges with Floating Debris // J. of Hyd. Engrg. 2000. ASCE. V. 126, N 5. P. 375.
8. Stansby P. K., Chegini A., Barnes T. C. D. The Initial Stages of Dam-Break Flow // J. Fluid Mech. 1998. V. 374. P. 407.