

УДК 532.529.4+556.535+627.157

Н. А. МИХАЙЛОВА, С. Г. БЕЛОШАПКОВА

ВЛИЯНИЕ ПОДВИЖНОЙ ШЕРОХОВАТОСТИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИЖЕНИЯ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОТОКЕ

Твердые частицы, находящиеся на границе турбулентного потока, непрерывно проникают в его толщу, совершая при этом скачкообразное движение. Явление такого рода наблюдается в ряде геофизических задач, а именно при движении наносов в реках и морях, при перемещении песка в пустыне, движении снега и т. д.

Моделирование указанных явлений в лабораторных условиях с целью изучения характеристик траекторий твердых частиц проводится часто при закрепленной шероховатости, над которой перемещаются отдельные подаваемые в поток частицы. При этом предполагается, что характер движения частиц при закрепленной и подвижной шероховатости является одинаковым. Такое же предположение содержится и во всех теоретических схемах скачкообразного движения твердых частиц.

В работе [1] указано, что подвижная шероховатость отличается от неподвижной. При наличии на дне потока подвижных частиц появляется вторичная, более крупная шероховатость в виде «бугорков», состоящих из нескольких песчинок. Однако характеристики новой шероховатости, возникающей при взаимодействии турбулентного потока и его нижней деформируемой границы, и влияние этой шероховатости на характеристики траекторий твердых частиц в указанной работе не исследовались.

В настоящей работе для выявления роли фактора подвижности дна были проанализированы траектории твердых частиц, полученные на основании обработки кинофильмов, снятых в бывшей Лаборатории русловых процессов АН СССР [1] на лотке длиной 264 см, шириной 6,1 см при средней скорости потока 45 см/с и глубине 1,7 см. Киносъемка проведена со скоростью 200 кадров/с. В потоке двигались песчинки размером 0,86 мм с гидравлической крупностью 8,97 см/с и плотностью 2,6 г/см³. На дне находились такие же частицы. Всего было проанализировано 96 траекторий, при этом наблюдались случаи, когда частица только катится, только сальтирует или участвует в смешанном движении (сальтация чередуется с качением).

Статистическая обработка фильма показала, что подвижное дно представляет собой изменяющуюся во времени и пространстве поверхность, заметно отличающуюся от плоскости. При определении координат отмечались положения частицы, когда она касалась дна; при этом принималось, что отметка неподвижного дна находится ниже центра тяжести частицы на половину ее диаметра. Все случаи касания частицей дна, ее отрыв, приземление и качение были проанализированы с целью выявления закономерности измене-

ния отметки дна, отсчитываемой от условной плоскости. Всего было проанализировано 560 отметок дна, относящихся к различным моментам времени и различным положениям частицы вдоль потока (по оси абсцисс). В зависимости от значения координаты отметки дна были разнесены по группам с интервалом 0,5 мм, и затем была построена

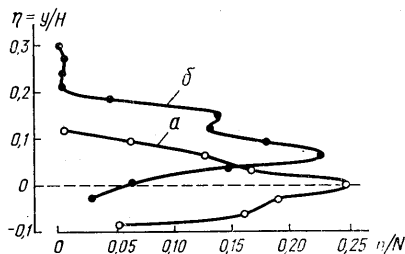


Рис. 1. Вероятностная кривая распределения отметок дна (распределение по глубине потока времени пребывания на фиксированном уровне катящихся частиц) (а) и распределение по глубине потока времени пребывания сальтирующих частиц (б)

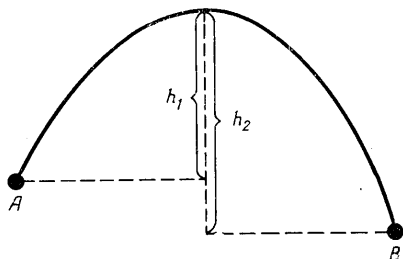


Рис. 2. Схема расположения точки отрыва *A* и приземления *B*

вероятностная кривая распределения отметок дна (рис. 1, кривая *a*). По оси ординат отложено относительное расстояние (y/H) от средней отметки дна, обозначенной пунктиром, а по оси абсцисс — величина n/N , где N — общее число случаев касания дна, n — число случаев касания в данном диапазоне расстояний, отнесенное к середине каждой зоны. Полученная кривая в силу способа ее построения может одновременно рассматриваться и как кривая распределения по глубине времени пребывания и концентрации на данном уровне частиц в случае их касания дна. Кривая почти симметрична относительно средней отметки дна, принятой за начало отсчета. Отклонение от среднего положения в обе стороны составляет величину порядка 1,5 мм, что равняется почти двум диаметрам частицы. При средней высоте скачка, равной 1,3 мм, полученная величина является существенной.

Изменение во времени отметки дна является существенной особенностью в отличие от случая закрепленной шероховатости, когда эта отметка имеет некоторое постоянное значение. Таким образом, при подвижной шероховатости структура потока непосредственно в придонной области определяется следующими факторами: укрупнением шероховатости за счет образования «бугорков», наличием твердых частиц, перемещающихся скачкообразно, и непрерывным изменением поверхности дна. Последнее обстоятельство ни в одной из работ ранее не рассматривалось. Обычно в опытах с подвижным дном фиксируется только его средняя отметка, например в работе [1]. Полученные результаты показывают, что такая информация является недостаточной.

Проанализируем далее кривую распределения (рис. 1, кривая *b*) концентрации (времени пребывания на фиксированном уровне) частиц, движущихся скачкообразно (без учета положений, соответствующих

случаям касания дна). Эта кривая, построенная по 558 положениям частиц на различных траекториях, сходна с кривой распределения времени пребывания на данном уровне частиц в случае их касания дна (кривая a), но расположена несколько выше последней. Кривая распределения концентрации салтирующих частиц является асимметричной. Положительные отклонения от наиболее вероятного значения концентрации встречаются чаще, чем отрицательные. Для определения об-

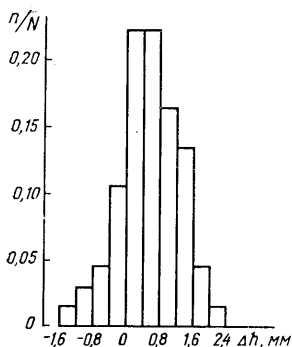


Рис. 3. Гистограмма распределения разницы высоты отрыва и приземления $\Delta h = h_2 - h_1$

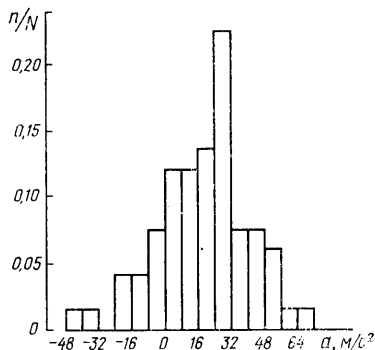


Рис. 4. Гистограмма распределения начального ускорения

щего твердого расхода необходимо просуммировать обе кривые распределения после умножения каждой концентрации на соответствующее значение средней скорости движения частиц.

При подвижном дне высотное положение точек отрыва A и приземления B может быть различным (рис. 2). Поэтому различной может оказаться и высота скачка при отсчете ее от точки отрыва A или приземления B (соответственно h_1 и h_2). На рис. 3 представлена гистограмма распределения разницы высот $\Delta h = h_2 - h_1$. Полученные результаты показывают, что в 81% случаев $\Delta h > 0$, т. е. с большей вероятностью частицы отрываются с уровней более высоких, чем уровни приземления. В случае же закрепленной шероховатости $\Delta h = 0$.

На основании анализа имеющихся данных была построена гистограмма (рис. 4) распределения ускорения твердых частиц a в момент их отрыва. Эта величина определялась как $a = 2\Delta y / (\Delta t)^2$. Здесь Δy — высота подъема частицы за время Δt , определяемое как $\Delta y = y_1 - y_0$, где y_0 — положение частицы в состоянии покоя, отсчитываемое от условной плоскости, а y_1 — расстояние центра частицы от той же плоскости на следующем кадре (через время Δt), когда частица находится уже во взвешенном состоянии. Здесь надо, конечно, иметь в виду, что точность определения момента отрыва частицы, как указано в работе [2], зависит от скорости съемки. Ускорение, определенное указанным способом, является осредненным за время Δt . При достаточно большом значении Δt (малой скорости съемки) теряется смысл определения «начального» ускорения. Наиболее вероятное значение начального ускорения равно 28 м/с^2 , т. е. почти в три раза превышает ускорение силы тяжести. Наблюдались случаи, когда начальное ускорение имело отрицательное значение. Следует подчеркнуть, что в слу-

чае закрепленной шероховатости в начальный момент (в случае отрыва) частица может двигаться только вверх. В рассматриваемом же случае при подвижной шероховатости в 18% случаев наблюдалось движение вниз. Именно этим случаям и соответствуют отрицательные значения ускорения. Средние значения углов вылета и приземления по абсолютному значению оказались одинаковыми и равными 12° . Наиболее вероятная продолжительность скачка равна 0,05 с.

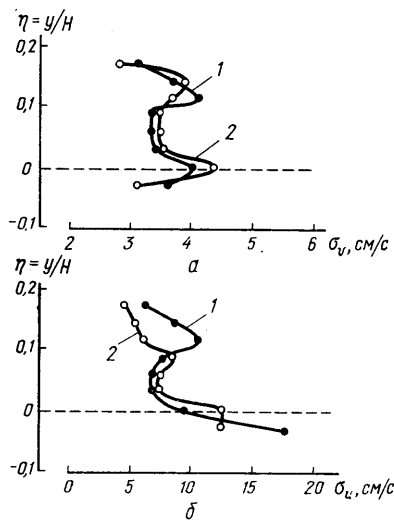


Рис. 5. Распределение по вертикали среднеквадратичного отклонения вертикальной (а) и горизонтальной (б) составляющей скорости твердых частиц (σ_v и σ_u соответственно): 1 — на подъеме траекторий, 2 — на спуске траекторий

ствков. Второй максимум σ_u (ниже средней отметки дна) четко не обнаружен.

Обсуждение результатов

1. Подвижное дно, состоящее из отдельных дискретных частиц, представляет собой изменяющуюся во времени и пространстве поверхность, суммарное отклонение которой от среднего положения в обе стороны имеет тот же порядок, что и средняя высота скачка твердой частицы.

2. Уровни отрыва твердых частиц с большей вероятностью расположены выше уровней их приземления.

3. Кривая распределения по глубине потока среднеквадратичных отклонений вертикальной компоненты скорости твердых частиц имеет два максимума (выше средней отметки границы раздела и на ее уровне). На кривой распределения среднеквадратичных отклонений горизонтальной компоненты скорости четко выражен только первый максимум.

4. В момент отрыва твердые частицы имеют весьма существенные ускорения. Так, при крупности частиц 0,86 мм и плотности $2,6 \text{ г/см}^3$ наиболее вероятное значение начального ускорения равно 28 м/с^2 .

Для восходящих и нисходящих участков траекторий были построены кривые распределения по глубине потока среднеквадратичных отклонений вертикальной σ_v (рис. 5, а) и горизонтальной σ_u (рис. 5, б) составляющих скорости для восходящих (кривые 1) и нисходящих (кривые 2) участков траекторий твердых частиц. На рисунках показано среднее положение отметки дна. Распределение величины σ_v характеризуется двумя максимумами. Один из них находится на относительной глубине 0,12H, а второй расположен на уровне средней отметки дна (где с большей вероятностью происходит отрыв частиц). Для восходящих участков траекторий максимум σ_u расположен несколько выше, чем для нисходящих участков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михайлова Н. А. Перенос твердых частиц турбулентными потоками воды. Л., 1966.
2. Архангельский М. М., Вербицкий В. С., Ключек З. Ш., Михайлова Н. А. В сб.: «Взаимодействие поверхностного и подземного стока», вып. 2. М., 1974.

Кафедра
Физики моря и вод суши

Поступила в редакцию
04.04.78

УДК 523.3:523.4

Ю. В. БАРКИН

НЕКОТОРЫЕ ПЕРИОДИЧЕСКИЕ ВОЗМУЩЕНИЯ В ПОСТУПАТЕЛЬНО-ВРАЩАТЕЛЬНОМ ДВИЖЕНИИ ЛУНЫ И МЕРКУРИЯ

§ 1. Уравнения движения. Порождающие периодические решения.

Рассмотрим плоское поступательно-вращательное движение твердого тела M_2 , обладающего плоскостью динамической симметрии, в поле притяжения шара M_1 , однородного или обладающего концентрическим распределением плотностей. Предположим, что центр масс O_2 тела M_2 описывает плоскую орбиту относительно центра O_1 шара M_1 .

Пусть O_1xy — система координат с началом в центре шара и с осями постоянной ориентации, расположенными в плоскости орбиты. Через $O_2\xi\eta\zeta$ обозначим оси собственной системы координат тела M_2 , которые направлены по его главным центральным осям инерции. Предположим, что координатная плоскость $O_2\xi\zeta$ является плоскостью динамической симметрии тела M_2 и в течение всего времени движения совпадает с неизменяемой плоскостью орбиты. Обозначим через A , B и C главные центральные моменты инерции тела M_2 , соответствующие его осям инерции $O_2\xi$, $O_2\eta$ и $O_2\zeta$, а через m_1 и m_2 — массы шара M_1 и тела M_2 .

Примем за невозмущенное движение кеплеровское эллиптическое движение центра масс тела M_2 в осях O_1xy и равномерное вращение тела M_2 относительно оси инерции $O_2\eta$ ортогональной плоскости орбиты. При этом вращение шара происходит независимо от окружающих тел и мы исключаем его из дальнейшего рассмотрения.

При сделанных предположениях поступательно-вращательное движение тел M_1 и M_2 опишем каноническими оскулирующими элементами [1]

$$L, G, H, l, g, h, \quad (1)$$

где $L = m\sqrt{\mu a}$, l — средняя аномалия, $G = m\sqrt{\mu a(1-e^2)}$, g — угловое расстояние до перигентра, H — величина вектора кинетического момента вращения тела M_2 , h — угол вращения тела M_2 , измеряемый в плоскости орбиты от направления оси O_1x до оси $O_2\xi$, a — большая полуось, e — эксцентриситет орбиты,

$$m = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}, \quad \mu = f(m_1 + m_2)$$

— постоянные параметры, f — гравитационная постоянная,

$$l = n(t - t_0) + l_0, \quad h = n_1(t - t_0) + h_0,$$