

мой задачи токи, порождаемые этими воздействиями, складываются; это нетрудно учесть, принимая во внимание, однако, что вклад различных источников приливных сил влияет на значения величин K , θ_0 и ψ).

Можно учесть и конечность проводимости почвы, в которую помещены электроды. Качественная зависимость здесь очевидна: чем выше эта проводимость, тем меньший ток (при прочих равных условиях) проходит по внешней части цепи, что также отвечает наблюдениям.

Повторим в заключение, что в настоящей работе учитывался лишь один — приливный бароэлектрический механизм формирования теллурических токов, хотя имеются и другие (например, грозовой) механизмы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьев В. И., Григорьева Е. В. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1989. № 5. С. 45 (Moscow University Phys. Bull. 1989. N 5. P. 43).
2. Григорьев В. И., Григорьева Е. В., Ростовский В. С. // Изв. АН СССР, Физика Земли. 1990. № 4. С. 3.
3. Григорьев В. И., Григорьева Е. В. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1991. № 5. С. 68 (Moscow University Phys. Bull. 1991. N 5. P. 66).
4. Григорьев В. И., Григорьева Е. В. // Там же. 1995. № 1. С. 61 (Ibid. 1995. N 1. P. 56).
5. Краев А. П. Основы геоэлектрики. М.; Л., 1951.

Поступила в редакцию
05.04.95

*) Поскольку угол долготы выбирается так, чтобы при $t=0$ вектор $\mathbf{n}$ лежал в плоскости $\varphi=0$.

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1996, № 4

УДК 532.5; 551.46; 551.51

О ВЛИЯНИИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ НА ОСАЖДЕНИЕ ЧАСТИЦ ИЗ СУСПЕНЗИОННОГО ПОТОКА

Ю. Г. Пыркин, И. Б. Романова, М. А. Силаев

(кафедра физики моря и вод суши)

Рассматривается влияние турбулентности на величину скорости осаждения частиц в суспензионном потоке. Анализируется модель, в основе которой лежит уравнение движения одиночной частицы в вязкой жидкости. Получена формула для расчета параметра нелинейности, который определяет зависимость силы сопротивления, возникающей при движении частицы, от скорости ее осаждения. На основе экспериментальных значений скорости осаждения частиц разной крупности в турбулентном потоке рассчитаны зависимости параметра нелинейности от числа Рейнольдса потока.

В природных условиях суспензионные потоки часто встречаются как одна из разновидностей плотностных стратифицированных течений. Устойчивость таких течений зависит от разности плотностей потока и окружающей его жидкости, которая в свою очередь для случая суспензионного потока определяется концентрацией взвешенных в жидкости твердых частиц разной крупности и различного происхождения. Перенос суспензионными течениями твердых частиц крупностью до 70—100 мкм во взвешенном состоянии может сильно влиять на экологическую обстановку водных бассейнов и прилегающих зон обитания человека. Вынос радионуклидов, например, из зоны Чернобыльской

АЭС во многом определяется взвешенными в воде твердыми частицами. И наиболее загрязненными являются мелкие частицы крупностью менее 50 мкм, так как они обладают высокими сорбционными свойствами.

По мере распространения суспензионных потоков массовая концентрация частиц, как правило, уменьшается в результате их выпадения из потока. Этот процесс влияет на дальность распространения вредных примесей. Определяющим параметром изменения концентрации частиц вдоль пути распространения потока является их скорость осаждения, которая в случае турбулентного режима движения потока заметно меньше стоксовой скорости свободного падения малых частиц [1].

Из-за крайне малочисленных экспериментальных данных о реальных скоростях ω_p осаждения мелких частиц в турбулентных потоках в качестве ω_p используют ее табличное значение, т. е. стоксову скорость ω_0 . Такой подход оправдан только для водных объектов с движением жидкости, близким к ламинарному. Однако в большинстве практических случаев суспензионные потоки турбулентны, а скорость осаждения частиц зависит от степени турбулизованности конкретного потока.

Малочисленные теоретические построения, использовавшие линейную зависимость силы сопротивления от скорости осаждения частиц, не приводят к их замедлению. Для крупных частиц большинство авторов ограничиваются только случаем квадратичной зависимости силы сопротивления. Как правило, оценки проводятся на основе уравнения движения одиночной частицы в потоке жидкости с последующим его обобщением на случай множества частиц. Это уравнение обычно записывается в следующем виде:

$$\frac{d\omega_p}{dt} = \frac{F}{\rho_p V} - \frac{\rho_p - \rho}{\rho_p} g - k \left(\frac{d\omega_p}{dt} - \frac{dW}{dt} \right) + \frac{\rho}{\rho_p} \frac{dW}{dt}, \quad (1)$$

где W — вертикальная компонента скорости жидкости, k — коэффициент присоединенной массы, $V = \pi d^3/6$ — объем частицы, d — ее диаметр, ρ_p — ее плотность, ρ — плотность жидкости, F — сила сопротивления, возникающая при движении частиц в жидкости:

$$F = -(\pi/8) C_p \rho d^2 |\omega_p| \omega_p, \quad (2)$$

C_p — коэффициент сопротивления частицы:

$$C_p = \alpha \left(\frac{\omega_p d}{\nu} \right)^{-n}, \quad (3)$$

α — эмпирический коэффициент, зависящий от размера частицы, ν — коэффициент кинематической вязкости жидкости, n — параметр нелинейности. Последние два члена в уравнении (1) существенны, только когда плотность частицы равна или меньше плотности жидкости [1—4]. Применение этой модели для суспензионного течения представляется возможным в силу малой ($\ll 1\%$) объемной концентрации его твердой фазы.

Исследование уравнения для одиночной частицы [2] показало, что использование его в виде (1) с соотношениями (2) и (3) приводит к эффекту замедления крупных частиц (более 0,2 мм) только при задании квадратичного закона сопротивления или близкого к нему:

$$\alpha = 0,44; n = 0, F \sim \omega_p^2. \quad (4)$$

Для малых частиц (менее 70 мкм) обычно полагают коэффициент пропорциональности α постоянным и равным 24, а зависимость силы сопротивления от скорости движения частиц принимается линейной ($n=1$). В этом случае из уравнения (1) нетрудно получить известную формулу Стокса:

$$\omega_p = \omega_0 = \frac{1}{18} \frac{\rho_p - \rho}{\rho} \frac{gd^2}{\nu} \quad (5)$$

И следовательно, частицы должны осаждаться со стоксовой скоростью [1, 2, 4]. Однако этот вывод противоречит нашим данным, полученным в ходе большого цикла специальных лабораторных экспериментов, поставленных с целью определения величины замедления малых частиц в суспензионном потоке в зависимости от степени его турбулизованности.

Моделирование придонного суспензионного потока проводилось на лабораторной установке в гидрофизической лаборатории физического факультета МГУ [2, 5]. Для проведения необходимых измерений была создана специальная аппаратура, в частности многосекционный пробоотборник, позволявший производить одновременный отбор проб суспензии по всей толщине потока h вдоль пути его распространения. Исследование поля средней скорости $\bar{U}$ течений и структуры турбулентности осуществлялось автоматизированным измерительным комплексом с двухкомпонентным датчиком скорости. Одновременно с отбором проб проводилась подготовка капелек суспензии с целью определения гранулометрического состава частиц твердой фазы потока, которая представляла собой природный ил со средней плотностью около 2,5 г/см. Методика проведения исследований включала отбор проб суспензии двумя-тремя пробоотборниками одновременно с 14 горизонтов в нескольких створах вдоль по потоку с синхронным измерением профиля средней скорости течения потока и параметров его турбулентной структуры. При этом уровень турбулентности, согласно прямым инструментальным данным, достигал 15%.

Было обнаружено, что только в ламинарном режиме течения суспензионного потока (при его числах Рейнольдса $Re = \bar{U}h/\nu \leq 300-350$) скорость осаждения ω_p используемых илстых частиц была стоксовой ($\omega_p = \omega_0$). Начиная с некоторого числа Рейнольдса потока Re_{cr} скорость осаждения частиц становится заметно меньше ω_0 . Для оценки параметра нелинейности n в соотношении (3) коэффициент α был положен равным 24 и использованы экспериментально измеренные значения ω_p и коэффициента турбулентной вязкости ν_t .

Из соотношений (2) и (3) видно, что коэффициент сопротивления C_p определяет характер зависимости силы сопротивления F от скорости ω_p осаждения частицы, т. е. $F \sim \omega_p^{2-n}$. В этих соотношениях не содержится ни одного параметра, прямо характеризующего степень турбулизованности суспензионного потока. Однако наш эксперимент в отличие от результатов многих исследователей показывает, что осаждение малых частиц в турбулентных потоках замедляется. Поэтому в соотношениях (1) — (3) необходим учет параметров турбулентности конкретного потока. Это возможно сделать путем замены в (3) кинематического коэффициента вязкости ν для ламинарного режима движения жидкости на коэффициент ν_t для турбулентного режима. Причем введение соотношения $\nu_t/\nu \sim Re/Re_{cr}$, предложенного Ландау, дает возможность получить расчетную зависимость для скорости падения малых частиц от параметров турбулентного потока при линейном законе

сопротивления [1]. Однако для средних и крупных частиц, начиная с некоторого числа Рейнольдса потока, имеет место отклонение от линейного закона.

Таким образом, определяя из уравнения (1) с учетом (2) коэффициент сопротивления C_p , из соотношения (3) легко получить расчетную формулу для параметра нелинейности n :

$$n = \log_{v_l/(\omega_p d)} \left(\frac{C_p}{\alpha} \right). \quad (6)$$

На рисунке приведен график зависимости параметра нелинейности n от числа Рейнольдса потока Re . Каждая из семейства кривых построена для определенной крупности частиц. Для случая, когда Re становится больше некоторого критического значения, взаимодействие потока со средними и крупными (более 10 мкм) частицами носит нелинейный характер, определяющий замедление частиц этих фракций в турбулентном потоке жидкости.

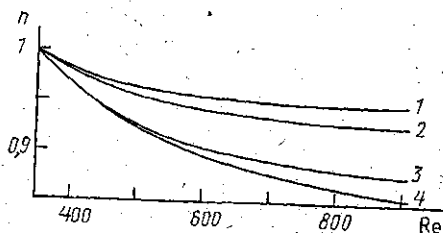


График зависимости параметра нелинейности n от числа Рейнольдса потока для частиц крупностью 8—12 (1), 12—16 (2), 16—20 (3) и 20—24 мкм (4)

Итак, установлено, что при переходе от ламинарного движения жидкости к турбулентному для частиц малой крупности необходимо учитывать нелинейность их взаимодействия с потоком.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пыркий Ю. Г., Силаев М. А. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1993. № 2. С. 77 (Moscow University Phys. Bull. 1993. N 2. P. 75).
2. Медников Е. П. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей. М., 1981.
3. Соу С. Гидродинамика многофазных систем. М., 1971.
4. Hwang P. // J. Hydraulic Engineering. 1983. 8, N 3.
5. Галкин С. В., Силаев М. А., Пыркий Ю. Г. Экспериментальное исследование энергообмена в турбулентном плотном течении: Деп. ВИНТИ. № 6081-B88. М., 1988.

Поступила в редакцию
29.05.95

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1996. № 4

УДК 551.466

НОВЫЙ ТИП УЕДИНЕННЫХ ВОЛН НА ВОДЕ

С. А. Арсеньев, М. М. Вахрушев, Н. К. Шелковников

(кафедра физики моря и вод суши)

Рассматривается задача описания нелинейных процессов, управляющих распространением уединенных волн на воде. Классическая теория Кортевега—де Фриза обобщается на случай учета нелинейного взаимодействия амплитудной и частотной дисперсий. Полученные формулы, предсказывающие уединенную волну нового типа, проверяются с помощью лабораторных экспериментов.