

**В. В. В а й т м а н** (Сочи, СГУТиКД). **Модель переработки поперечного берегового склона, сложенного неоднородными наносами.**

Искусственные и естественные пляжи представляют собой одновременно берегозащитные сооружения и важный рекреационный ресурс береговой зоны моря и способны эффективно гасить энергию волн. Под волновым воздействием пляжи перерабатываются, и соответствующие прогнозы имеют большое значение для приложений. Вместе с тем, моделирование динамического поведения пляжа под действием волн является сложной задачей в связи с участием факторов и процессов, описание которых не вполне понятно до настоящего времени. В частности, это относится к эффектам неоднородности гранулометрического состава материала, слагающего пляж.

Разработана математическая модель переформирования поперечного профиля пляжа, сложенного неоднородными наносами [1]. Переформирования профилей пляжей, сложенных неоднородными и однородными наносами могут существенно различаться при прочих равных условиях. Важность учета неоднородности гранулометрического состава была подтверждена серией экспериментов, проведенных автором в Отраслевой научно-исследовательской лаборатории морских гидротехнических сооружений Московского государственного строительного университета, и данными других авторов. Эксперименты проводились с откосами, сложенными песчаными смесями с разной степенью неоднородности гранулометрического состава.

Рассматривается определение условий начала движения для отдельных фракций в неоднородной смеси наносов. В модели для определения условий начала движения развивается подход [5], основанный на трансформации классической критической кривой Шильдса для однородных наносов в координатах  $(\Theta - D^*)$ , где  $\Theta = \tau / (\gamma_s - \gamma) D$  — параметр Шильдса или параметр мобильности,  $\tau$  — придонное касательное напряжение,  $\gamma_s, \gamma$  — удельные веса материала наносов и воды, соответственно,  $D$  — диаметр частиц наносов,  $D^* = D[(s-1)g/\nu^2]^{1/3}$  — седиментологический диаметр наносов,  $s = \gamma_s/\gamma$ ,  $\nu$  — вязкость жидкости. Пороговые условия в смеси фракций могут быть представлены в виде деформированной кривой  $\Theta - D^*$ , которая пересекается с кривой Шильдса для однородных наносов в точке Р (рис. 1). Степень отклонения трансформированной кривой от исходной кривой Шильдса зависит от степени неоднородности смеси наносов.

Следующей задачей является прогноз морфологических изменений профиля дна в процессе волнового воздействия, решение которой основывается на законе сохранения массы [2]:

$$\frac{\partial d}{\partial t} = \frac{\partial q_x}{\partial x}, \quad (1)$$

где  $d$  — глубина воды,  $t$  — время,  $x$  — расстояние по горизонтали от глубокой воды в сторону берега,  $q_x$  — поперечный берегу объемный расход наносов на единицу ширины пляжа. Интегрирование уравнения (1) позволяет определить значения глубин в данный момент времени  $d(x, t)$  по известному распределению поперечного объемного расхода наносов  $q_x$ .

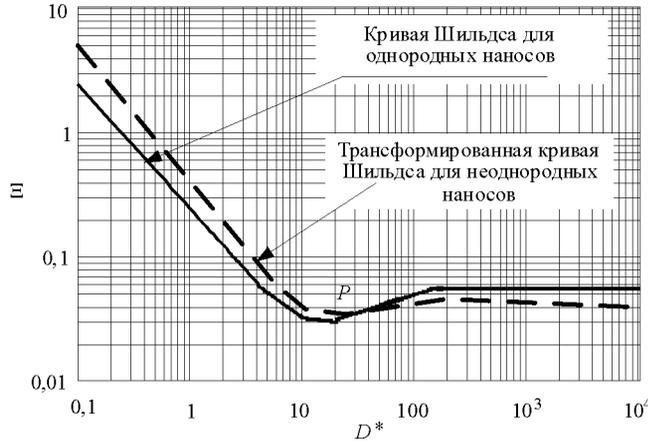


Рис. 1. Графики начала движения наносов для однородной и неоднородной смесей

Численную схему следует выбирать исходя из условий ее устойчивости, то есть необходимо, чтобы даже при достаточно большом временном шаге, появляющиеся возмущения (осцилляции) не развивались, а подавлялись. Схема Лакса-Вендроффа [4], отвечает этим требованиям в наибольшей мере. По схеме Лакса-Вендроффа каждый шаг по времени расщепляется на две итерации. На первой итерации вычисляется промежуточный массив глубин для временного шага  $n + 1/2$ :

$$h_i^{n+1/2} = \frac{1}{2}(h_i^n + h_{i+1}^n) + \frac{1}{2} \frac{\Delta t}{\Delta x} (q_{i+1}^n - q_i^n), \quad (2)$$

а на второй итерации рассчитываются соответствующие расходы для шага  $n + 1/2$  и определяется профиль глубин для шага  $n + 1$ :

$$h_{i+1}^{n+1} = h_{i+1}^n + \frac{\Delta t}{\Delta x} (q_{i+1}^{n+1/2} - q^{n+1/2}_i). \quad (3)$$

Значение глубины при  $i = 0$  находится из граничного условия. Начало расчетного створа располагается за пределами активной части профиля, что позволяет полагать значение  $h_0$  постоянным во времени (при неизменном уровне воды). Размер пространственного шага  $\Delta x$  составляет порядка 0,01 длины створа, а шаг по времени  $\Delta t$  был выбран исходя из условия [3]:

$$\frac{\delta t}{T_p} < \frac{10}{\beta^2} \sqrt{\frac{\bar{d}_s}{H_{rms0}}}, \quad (4)$$

где:  $\beta$  — средний уклон пляжа,  $d_s$  — средний размер песка,  $H_{rms0}$ ,  $T_p$  — среднеквадратичная высота волн на входе и период пика волн. Для пологого пляжа с уклоном 0,01–0,02 величина  $\Delta t$  может составлять порядка  $10^2 T_p$ , а для крутых береговых дюн она уменьшается до нескольких периодов волн.

Для поперечного расхода наносов принимается следующая зависимость Ohnaka–Watanabe [6]:

$$q_x = \Phi[A_w(\tau_w - \tau_c) + A_b \tau_B] u_m / \rho g, \quad (5)$$

где  $\tau_w$  и  $\tau_B$  — придонные напряжения, создаваемые волной и турбулентностью, соответственно,  $\tau_c$  — критическое напряжения для наносов данного диаметра,  $A_w$  и  $A_B$  — эмпирические коэффициенты,  $u_m$  — амплитуда придонной волновой скорости и  $\Phi$  — функция направления транспорта наносов. В данной математической модели

для каждой фракции в смеси наносов учитывалось собственное критическое напряжение по трансформированной кривой Шильдса. Трансформация критической кривой производилась в соответствии с реальным гранулометрическим составом смеси наносов. Уравнение (1) решалось численно методом конечных разностей. По разработанной модели были выполнены расчеты для условий проведенных экспериментов. При сравнении результатов математического моделирования с соответствующими экспериментальными данными было получено удовлетворительное соответствие переработанных профилей (рис. 2).

Средняя относительная ошибка расхождения измеренного и расчетного профиля, определяемая по глубинам воды составляет для данного опыта 3,5%, относительная ошибка, определяемая по объемам пляжа, — 1,2%. Выполненные исследования были поддержаны грантами РФФИ 06-05-08015 и 06-05-96673, а также грантом Президента РФ для государственной поддержки ведущих научных школ РФ НШ-8671.2006.5.

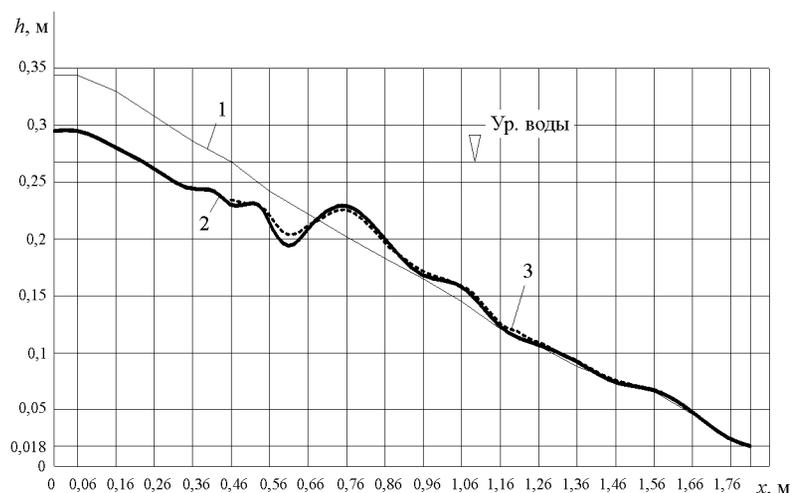


Рис. 2. Графики экспериментального и расчетного профилей для условий эксперимента № 1: 1 — начальный профиль, 2 — экспериментальный профиль, 3 — расчетный профиль

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вайтман В.В., Кантаржи И.Г. Моделирование переформирования поперечного профиля пляжа, сложенного неоднородными наносами. — Обозрение прикл. и промышл. матем., 2006, т. 13, в. 6, с. 1060–1062.
2. Леонтьев И. О. Прибрежная динамика: волны, течения, потоки наносов. М.: ГЕОС, 2001.
3. Леонтьев И. О. О динамических изменениях профиля пляжа во время шторма. — Океанология, 1997, т. 37, № 1, с. 136–144.
4. Пейре Р., Тэйлор Т.Д. Вычислительные методы в задачах механики жидкости. Л.: Гидрометеоиздат, 1986, 352 с.
5. Bettess R. A one-layer model to predict the time development of static armour. — J. Hydraulic Res., 2003, v. 41, № 2, p. 179–194.
6. Ohnaka S., Watanabe A. Modelling of wave-current interaction and beach change. — In: Proceedings of the 22nd Int. Conf. on Coastal Eng. Delft, 1990, p. 2443–2456.