

ЛИТЕРАТУРА

1. Ц а й т ц \Е.С. Действие волн на откос из несвязных грунтов: Автореф. канд. дис.... канд. техн. наук. — Киев, 1958. — 20 с. 2. М а к с и м ч у к В.Л. Основы динамики пляжевого процесса: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. — М., 1975. — 40 с. 3. П ы ш к и н Б.А. Динамика берегов водохранилищ. — Киев, 1970. — 351 с. 4. М а л ь ц е в В.П. Экспериментальные исследования динамики профиля галечного пляжа. — В кн.: Вопросы гидравлики прибрежной зоны водоемов. М., 1976, вып. 99, с. 64–77. 5. Я р о с л а в ц е в Н.А. Исследования динамики галечного пляжа. — Водные ресурсы, 1981, № 5, с. 77–81. 6. Основания гидротехнических сооружений, СНиП II-16-76. — М., 1977, с. 193.

УДК 551.466.61

А.И.ДОБРОЛЮБОВ, канд.техн.наук
(ИТК АН БССР)

О ПЕРЕНОСЕ ЖИДКОСТИ ОДИНОЧНОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ВОЛНОЙ

Задача о волновых движениях жидкости относится к числу сложных и окончательно нерешенных задач гидромеханики. Особенно сложными являются решения в "дифференциальной" постановке этой задачи, т.е. нахождение скоростей и траекторий отдельных частиц жидкости. "Интегральный" подход к решению этой задачи, когда объектом поиска служат осредненные характеристики (скорости, расходы) волнового движения, является более результативным с точки зрения практических выводов и в то же время, как правило, требует менее сложного математического аппарата [1] .

Далее решается задача нахождения осредненных во времени и по сечению скоростей и расходов жидкости, осуществляемых бегущими (прогрессивными) волнами на поверхности водоема. Показано, что бегущие одиночные волны, независимо от глубины водоема, переносят воду в направлении своего движения. Причем объем переносимой воды равен объему гребня волны, а движение частиц воды носит шаговый ("эстафетно-последовательный") характер.

Рассмотрим рис.1, на котором изображена движущаяся одномерная (плоская) одиночная волна на поверхности открытого водоема постоянной ширины B . Покажем, что такая волна, переместившись вдоль поверхности воды на расстояние L , переносит на то же расстояние воду в количестве, равном объему выпуклой части волны (заштрихованная часть на рис. 1). Для этого используем прием из литературы [2], Свяжем с движущейся волной подвижную K' -систему координат $x'oy'$, ось x' которой совпадает с осью x неподвижной K -системы $хоу$. K' -система движется вдоль оси x со скоростью \tilde{v} волны. Поэтому волна (но не жидкость!) неподвижна относительно K' -системы. Считаем жидкость идеальной, т.е. лишенной вязкости и несжимаемой. Рассмотрим движение жидкости относительно K' -системы как стационарный поток жидкости в жестком неподвижном закрытом канале переменного поперечного сечения. Верхняя жесткая стенка ("крыша") канала имеет волнообразную форму, дно — гладкое. Очевидно, что расход относительно K' -системы в спокойной (недеформированной волной) части этого канала будет $Q = S_0 \tilde{v}$, где

$S_0 = Bh_0$ — сечение рассматриваемой части канала. Этот расход ввиду стационарности потока постоянен в любом сечении канала, что дает возможность вычислить горизонтальную осредненную по сечению скорость v'_x воды относительно K' -системы в любом поперечном сечении $S_x = Bh_x$ канала:

$$v'_x = -\frac{Q}{S_x} = -\frac{S_0 \tilde{v}}{S_x} = -\frac{Bh_0 \tilde{v}}{Bh_x} = -\frac{h_0 \tilde{v}}{h_x}.$$

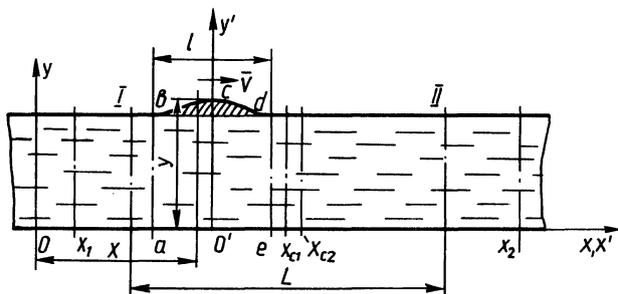


Рис. 1. Расчетная схема для нахождения массопереноса одиночной поверхностной волны.

Для нахождения скорости v_x воды относительно неподвижной K -системы придадим K' -системе обратную скорость, равную $-\tilde{v}$, тем самым сделав последнюю неподвижной. Теперь жидкость в неподвижном канале получит скорость, равную сумме переносной и относительной скоростей:

$$v_x = \tilde{v} - \frac{h_0 \tilde{v}}{h_x} = \tilde{v} \left(1 - \frac{h_0}{h_x}\right). \quad (1)$$

Это выражение дает значение мгновенных, осредненных по сечению горизонтальных скоростей в неподвижном канале (см. рис. 1), по поверхности которого со скоростью \tilde{v} движется одиночная выпуклая волна. Из (1) следует, что скорость горизонтального переноса воды на участке волны (где $h_x > h_0$) положительна, а на спокойных участках канала вне волны (где $h_x = h_0$) равна нулю.

Из этого же выражения следует, что мгновенный расход Q_x (объем, перемещаемый в единицу времени) в сечении S_x

$$Q_x = v_x S_x = \tilde{v} \left(1 - \frac{h_0}{h_x}\right) Bh_x = \tilde{v} B (h_x - h_0).$$

Найдем массу (объем) воды, переносимой в горизонтальном направлении одиночной волной. Очевидно, что массоперенос (расход) воды на спокойной части канала равен нулю, так как здесь $v_0 = 0$. Объем Q , переносимый волной длиной l за время T прохождения волны по данному сечению S_x (массоперенос волны):

$$\tilde{Q} = \int_0^T Q_x dt = \tilde{v}B \int_0^T (h_x - h_0) dt .$$

Так как $x = \tilde{v}t$ и $dt = dx/\tilde{v}$, то

$$\begin{aligned} \tilde{Q} &= \tilde{v}B \int_0^1 (h_x - h_0) dx / \tilde{v} = B \int_0^1 (h_x - h_0) dx = B \left(\int_0^1 h_x dx - \right. \\ &\left. - \int_0^1 h_0 dx \right) = B(S(abcde) - S(abde)) = B\Delta S = \Delta V . \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь $S(abcde)$ и $S(abde)$ — площади сечений $abcde$ и $abde$, соответственно, (рис. 1); ΔS — площадь сечения гребня волны (заштрихована); ΔV — объем жидкости, заключенный в волновой части (гребне).

Изложенный метод нахождения скоростей и величин переносов жидкости применим при условии, что недеформированные участки (участки вне волны) слоя жидкости неподвижны. Это условие соблюдается в случае отсутствия внешних тангенциальных сил (ветра, атмосферного давления, сил инерции и т.п.), действующих на жидкость. В случае идеальной жидкости, когда отсутствует "гребковое" действие движущихся в жидкости твердых тел, а сопротивление движению жидкости в канале любой формы равно нулю, эти условия также соблюдаются, что делает правомочным прием, заключающийся в сообщении каналу переносного движения относительно жидкости. Этим приемом мы пользовались при выводе формул (1) и (2).

В реальных водоемах, когда, кроме волнового движения, может происходить перемещение воды под действием ветра, атмосферных перепадов давления, действия соседних течений, найденные волновая скорость и массоперенос могут рассматриваться как скорость и массоперенос собственно волнового движения. Последнее является компонентой сложного движения, когда переносное движение осуществляется под действием других (неволновых) факторов.

Описанный характер волнового движения свидетельствует о том, что одиночная выпуклая волна, движущаяся по водной поверхности, переносит воду дискретным (импульсным, или шаговым) способом. В дискретном характере переноса воды выпуклой волной, непрерывно движущейся в одном направлении, можно убедиться следующим образом. Перекроем канал (см. рис. 1) поперечными перегородками в точках x_1 и x_2 , тем самым предотвратив в нем сквозное движение воды. Тем не менее при перемещении волны из положения I в положение II вдоль канала произойдет, в соответствии с вышеприведенными зависимостями, перемещение воды объемом $\Delta V = B\Delta S$. Факт переноса воды движущейся выпуклой волной можно также доказать непосредственно по данным рис. 1. Когда гребень волны в положении I, центр тяжести водной массы на участке $x_1 - x_2$ находится в точке x_{c1} . Когда волна переместилась вправо, в положение II, центр тяжести, очевидно, также переместится вправо, в некоторое положение x_{c2} .

Из факта горизонтального переноса воды в канале (см. рис. 1), произведенного лишь волновой частью, приходим к заключению, что в канале во время движения волны может иметь место один из двух типов перемещения частиц жидкости:

а) частицы воды, заключенные в гребне волны (заштрихованная часть на рис. 1), движутся вместе с гребнем со скоростью движения волны \tilde{v} , а остальная часть воды остается неподвижной (здесь все происходит таким образом, как если бы движущийся гребень волны отвердел, но продолжал движение по поверхности воды с прежней скоростью \tilde{v});

б) частицы воды, заключенные в гребне волны, непрерывно обновляются (замещаются) частицами из остальной массы воды, находящейся вне гребня. В этом случае объем движущегося гребня волны является постоянным по величине, но переменным по составу.

Оба типа движения эквивалентны друг другу с точки зрения переносимой ими массы воды, однако они весьма различны по характеру движения частиц воды. Путем наблюдений и несложных экспериментов можно убедиться в том, что в реальных условиях имеет место лишь второй (б) тип движения, сопровождающийся непрерывным "последовательно-эстафетным" обменом водой между гребнем волны и остальной частью водоема. Выпуклая относительно поверхности водоема волна вбирает в себя частицы воды в области своего переднего фронта, переносит их на некоторое расстояние и затем высвобождает эти частицы в области своего заднего фронта, где частицы воды переходят из гребня в основную массу водоема и сохраняют там состояние покоя. Каждая частица воды поверхностного слоя водоема, таким образом, совершает тягловое горизонтальное перемещение в направлении движения волны. Траектории частиц воды мы здесь рассматривать не будем, так как их характер в данном случае не влияет на объем переносимой воды.

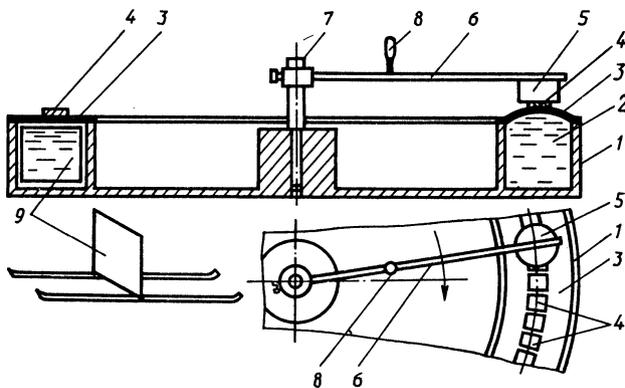


Рис. 2. Схема прибора, демонстрирующего волновой массоперенос и дискретный (импульсный) характер движения жидкости.

Описанное явление переноса воды выпуклой волной и дискретный (шаговый) характер движения частиц воды можно подтвердить экспериментально несколькими способами. Один из экспериментов, проведенный автором, описан ниже. Круговой корпус 1 (рис. 2), выполненный из прозрачного материала (оргстекла), содержит круговой канал 2 прямоугольного сечения, который до краев заполнен водой. На поверхности воды натянута тонкая резиновая мем-

брана 3, герметично прикрепленная к корпусу 1. К внешней поверхности мембраны 3 прикреплены (приклеены) пластинки 4 из ферромагнитного материала. Постоянный магнит 5, прикрепленный к подвижному стержню 6, связанному с подвижной относительно корпуса осью 7, можно при помощи рукоятки 8 перемещать по круговой траектории над ферромагнитными пластинками. Пластинки, притягиваясь к магниту, образуют подвижную выпуклость (выпуклую волну) на резиновой мембране и водной поверхности в канале 2. В канале 2 находится подвижная легкая перегородка-индикатор 9, которая приходит в движение вместе с частицами воды в данном сечении канала.

Прибор работает следующим образом. Вращением при помощи рукоятки 8 оси 7 стержень 6 с прикрепленным к нему магнитом 5 приходит в круговое движение, приводя в движение в свою очередь выпуклую волну вдоль поверхности воды. Индикатор 8 при этом указывает направление и характер движения частиц воды в канале. Результаты проведенного эксперимента показали, что во время движения волны над индикатором 9 последний совершает движение в направлении движения волны, а в остальное время находится в покое. Тем самым доказывается существование шагового переноса воды движущейся выпуклой волной.

Шаговый характер перемещения частиц воды в открытых водоемах выпуклой одиночной волной (называемой иногда волной перемещения), был описан в литературе. Например: "Две характерные особенности отличают волны перемещения от обычных колебательных волн ... Во-первых, форма такой волны целиком расположена выше уровня спокойной воды. Это значит, что волна имеет только гребень и не имеет ложбины. Во-вторых, при прохождении формы волны происходит действительное перемещение частиц воды. Предмет, плавающий на поверхности, будет отнесен волной перемещения на большее расстояние вперед и затем остановится на месте, не совершая при этом никакого движения в обратном направлении, что имело место в случае колебательной волны" [3]. Массоперенос, осуществляемый одиночной морской волной, деформированной на мелководье прибрежной зоны, рассмотрен в работе [4].

В заключение отметим, что описанные выводы о переносе вод выпуклой бегущей волной могут послужить основанием для выдвижения гипотезы о западном переносе вод в тропической зоне Мирового океана под действием прогрессивных приливных волн, которые можно рассматривать как одиночные волны планетарного масштаба, движущиеся в субширотном западном направлении [5].

ЛИТЕРАТУРА

1. Ч у г а е в Р.Р. Гидравлика. — Л., 1982, с. 10.
2. Д о б р о л ю б о в А.И. О перемещении слоя деформируемого тела под действием движущейся локальной деформации. — Докл. АН БССР, 1981, т. 25, № 6, с. 522—525.
3. Б а с к о м В. Волны и пляжи. — Л., 1966, с. 171.
4. М у н к В. Теория одиночных волн и ее применение к зоне прибоа. — В кн.: Основы предсказания ветровых волн, зыби и прибоа. М., 1951, с. 403—449.
5. Д о б р о л ю б о в А.И. О волновом переносе массы деформируемых тел и жидкостей. — Докл. АН БССР, 1983, т. 27, № 7, с. 624—627.