

Н. В. ВЕРШИНСКИЙ

## К ВОПРОСУ О СИЛОВЫХ ФАКТОРАХ В БЕРЕГОВОЙ ЗОНЕ

(Представлено академиком В. В. Шулейкиным 10 X 1952)

В 1949 г. Н. В. Вершинским, А. А. Депрейсом и А. П. Кестнером был сконструирован новый прибор для исследования гравитационных колебаний жидкости.

В 1951 г. мною было отмечено, что прибор этого типа может быть поставлен в два различных режима, когда отклонения его подвижной системы близки по фазе к колебаниям волновой скорости или к колебаниям волнового ускорения. В этом последнем случае прибор регистрирует гидродинамическую силу, не учитывавшуюся ранее.

Изучение этой силы представляет большой интерес при исследовании динамических процессов в береговой зоне морей и водохранилищ, так как до сих пор в этом случае учитывались лишь две силы: силы, связанные с сопротивлением формы, и силы трения.

Наиболее мощным силовым фактором в береговой зоне до настоящего времени считалась сила, возникающая вследствие сопротивления формы при обтекании того или иного тела водным потоком. Величина этой силы для потока, воздействующего на твердую частицу, обычно подсчитывается по формулам вида:

$$P_v = k s \rho v^n,$$

где  $k$  — коэффициент обтекания;  $s$  — площадь сечения обтекаемого тела в направлении, перпендикулярном к направлению движения;  $\rho$  — плотность воды;  $v$  — скорость потока;  $P_v$  — сила, действующая на обтекаемое тело;  $n \leq 2$ .

Из общего уравнения для гидродинамического давления, которое может быть написано в виде

$$\frac{P}{\rho} = \text{const} - \frac{dF}{dt} - \frac{v^2}{2},$$

где  $F$  — потенциал скоростей, следует, что должна существовать слагающая гидродинамического давления в фазе с ускорением потока. Величина давления будет зависеть от формы тела. Шаровидные тела являются наиболее распространенными в прибойной зоне (галька).

Н. Е. Жуковский <sup>(1)</sup> дал расчетную формулу для силы, действующей на неподвижный твердый шарик в изменяющемся потоке:

$$P_w = \frac{3}{2} m w,$$

где  $m = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho$ ,  $r$  — радиус шарика,  $w$  — ускорение потока.

Из формулы Жуковского следует, что сила действия изменяющегося потока жидкости на неподвижный неизменяющийся шарик направлена по ускорению потока и равна  $\frac{3}{2}$  массы вытесненной жидкости, умноженной на ускорение потока.

Практический интерес представляет отношение между обеими гидродинамическими силами, т. е. силой, пропорциональной ускорению потока, и силой, пропорциональной квадрату скорости. Нетрудно подсчитать, что это отношение для правильных круговых орбит частиц жидкости при  $n = 2$  будет равно

$$\frac{P_w}{P_v} = \frac{4r}{A_z},$$

где  $A_z$  — амплитуда волны на глубине  $z$ . Последнее отношение показывает, что до тех пор, пока  $4r > A_z$ , сила  $P_w$  будет преобладать над силой  $P_v$ ;  $P_w = P_v$  при  $4r = A_z$  и, наконец,  $P_v > P_w$  при  $A_z > 4r$ .

Экспериментальная проверка изложенных соображений легко



Рис. 2. Схема размещения приборов при опытах в лотке. 1 — электрический волнограф со спиралькой, регистрирующий волны на поверхности; 2 — прибор ВДК; 3 — волнопродуктор

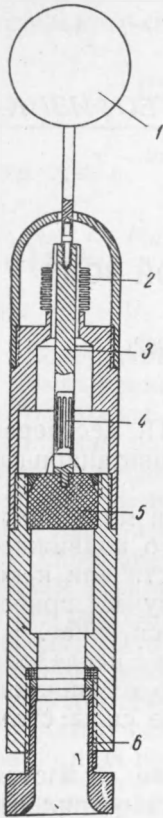


Рис. 1. Прибор ВДК для измерения волнового давления. 1 — пустотелый шар, воспринимающий волновое давление; 2 — сильфон; 3 — упругий стержень; 4 — проволочный датчик сопротивления; 5 — демпфирующая заделка; 6 — сальник для вывода кабеля

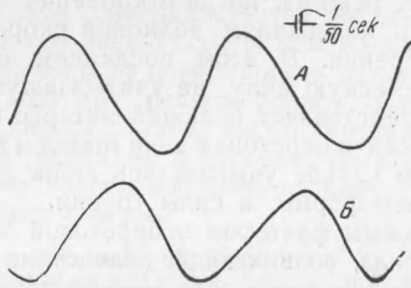


Рис. 3. Осциллограммы, записанные при помощи приборов, установленных согласно рис. 2. Отметка времени —  $\frac{1}{50}$  сек. А — волны на поверхности; Б — колебания, зарегистрированные прибором ВДК

осуществляется при следующей методике измерений: в волновой лоток помещается прибор ВДК с жесткой подвижной системой и шаром в качестве приемника градиента давления, установленный для регистрации горизонтальной составляющей волновых колебаний воды.

Устройство измерительной головки прибора показано в разрезе на рис. 1.

Отклонения прибора предварительно тарируются в граммах при помощи динамометра. На одной линии с прибором в лотке помещается спиралька электроволнографа, который служит для регистрации профиля поверхностных волн над центром приемного шарика прибора ВДК. Схема расположения приборов показана на рис. 2.

На рис. 3 приведен образец осциллограммы, зарегистрированной при помощи обоих приборов. По осциллограммам измерялось ампли-

тудное значение волн на поверхности и вычислялась амплитуда волны в точке, соответствующей центру приемного шара прибора ВДК. По вычисленной таким путем амплитуде подводной волны и измеренным периоду и длине волны на поверхности вычислялось значение центростремительного ускорения жидкости в центре приемного шара. Результаты двух опытов сведены в табл. 1.

Таблица 1

№№ опытов	Длина волны в м	Период волны в сек.	Амплитуда волны на по- верхн. в см	Глубина по- груж. центра шара в м	Амплитуда волны на глу- бине в см	Диаметр шара в см	$P_w$ в г		$P_w$ в г расч.
							расч.	измер.	
1	0,8	1,1	3,3	0,1	1,45	3,8	2,0	2,2	0,37
2	0,8	1,1	3,3	0,1	1,45	5,6	6,6	7,0	0,85

Интересно отметить, что, в соответствии с формулой Жуковского, сила  $P_w$  не зависит от массы приемного шарика, если, конечно, при изменении массы шарика собственная частота подвижной системы прибора остается достаточно высокой. Данные таблицы, полученные опытным путем и расчетом, удовлетворительно совпадают между собой в пределах точности опыта.

Цифры таблицы, относящиеся к силе волнового давления, пропорциональной ускорению, имеют значительную величину по отношению к силе, пропорциональной квадрату скорости. Поэтому сила  $P_w$  должна учитываться при изучении динамических процессов на берегах. Учет силы  $P_w$  приводит, в частности, к изменению условий устойчивости на сдвиг поверхностного слоя твердых частиц в потоке, на поверхности которого имеется волнение. Такой случай, например, имеет место в прибойной зоне при наличии у дна компенсационного течения в сторону моря. В этом случае условие равновесия, вместо обычного выражения для русловых потоков <sup>(2)</sup>, должно быть написано в форме:

$$(G - P_w - P_b) C \geq P_L,$$

где  $G$  — вес частицы,  $P_b$  — подъемная сила,  $C$  — коэффициент трения,  $P_L$  — лобовое сопротивление частицы.

Необходимость изменения условия равновесия следует из того, что при прохождении над рассматриваемой частицей ложбины волны будет момент, когда вектор ускорения в волне направлен вертикально. В этом случае сила  $P_w$  будет вычитаться из силы тяжести, что существенно изменяет условия равновесия частицы на грунте. Большая величина силы  $P_w$  должна заметно понижать критическое значение скорости потока, соответствующее переходу твердых частиц к состоянию взвешивания и переноса. Наоборот, при данной скорости потока наличие волн на его поверхности должно дать большее насыщение потока наносами вследствие того, что градиентные силы возьмут на себя часть работы по поддержанию частиц во взвешенном состоянии — обстоятельство, которое может быть, видимо, практически использовано для пульповодов.

В настоящее время еще трудно оценить полное значение рассмотренной нами силы как нового фактора в учении о динамике берегов. Тем не менее, очевидна ее значительная роль. Асимметрия ускорений должна учитываться наряду с асимметрией скорости. Вследствие значительной плотности воды и больших значений волнового ускорения

при гравитационных колебаниях в воде эта сила в рассматриваемом случае имеет большое значение.

Описанная работа была начата в 1949 г. по предложению проф. В. П. Зенковича, за неизменное внимание и поддержку которого пользуюсь случаем выразить ему благодарность.

В заключение автор считает своим приятным долгом выразить благодарность Ученому совету Морского гидрофизического института Академии наук СССР за внимательное обсуждение настоящей работы и ряд ценных советов.

Поступило  
9 X 1952

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> Н. Е. Жуковский, Тр. Отд. физ. наук О. Л. Е., 8, в. 2, 25 (1896).  
<sup>2</sup> И. И. Леви, Динамика русловых потоков, 1948, стр. 88.