

Экспериментальные и экспедиционные исследования

УДК 551.46 : 532.521.1 : 626/627.03

В.Х. Давлетшин

Аэрация прибойных волн

Приведены результаты измерений аэрации волн, трансформирующихся в прибойной зоне, а также аэрации прибойных волн, действующих на вертикальные и откосные сооружения. Измерения проведены в большом волновом лотке за пределами влияния масштабного эффекта с использованием приборов для измерения электропроводности водовоздушных смесей.

Введение. Прибойными называются волны, распространяющиеся с постепенным разрушением гребня из-за уменьшения глубины. Характерным признаком прибойных волн является наличие на фронтальной части гребня насыщенного пузырьками воздуха вальца. Насыщение волн воздухом (аэрация) зависит от наличия ветра, термодинамических условий у поверхности воды и условий трансформации волн у берега и перед сооружением, определяющих тип разрушения волн. Наличие сжимаемого воздуха существенным образом сказывается на давлении, оказываемом разрушающимися волнами на суда, берега и гидротехнические сооружения (см., например, [1]).

Согласно современным представлениям [2], по достижении предела устойчивости по Стоксу (угол при вершине волны 30°) часть жидкости срывается с гребня и падает в виде струи на фронтальную часть волны, вовлекая в волну пузырьки воздуха. Средняя плотность насыщенной воздухом воды зависит от наклона фронтальной части волны и уменьшается при его увеличении. По расчетам средняя плотность газожидкостной смеси в вальце составляет 0,65 [3]. Детальные результаты исследования аэрации постепенно разрушающихся волн в лаборатории приведены в [4]. Захват в волну больших объемов воздуха происходит при потере гребнем волны устойчивости и обрушении на отмели или у сооружения по типу «ныряющего буруна». Устойчивость волн и условия их разрушения по этому типу обрушения подробно исследованы в работе [5] и др.

Методика анализа. Систематические натурные исследования аэрации разрушающихся и прибойных волн в силу понятных причин практически невозможны. В то же время возможности исследования аэрации волн в большинстве существующих волновых лотков (каналов) ограничены известным в лабораторной практике масштабным эффектом. Очевидно, что для этих целей могут быть использованы только современные большие волновые лотки, в которых исследования разрушения волн и аэрации возможны за пределами влияния масштабного эффекта. По исследованиям, проведенным во ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева [6, 7], для выхода за границы проявления масштабного

© В.Х. Давлетшин, 2007

эффекта необходимы лотки с генераторами волн, позволяющими возбуждать волны высотой более 50 см.

Рассмотрим вопрос о возможном содержании воздуха в разрушающейся волне. Воздушные пузырьки, вовлекаемые в воду, благодаря малым размерам имеют форму шаров. Известно несколько работ, посвященных теоретическим и экспериментальным исследованиям плотности упаковки упорядоченно и беспорядочно набросанных шаров. Минимальная пористость, соответствующая наиболее плотной упаковке шаров, получается по формуле Слихтера [8] при тетраоктаэдрической укладке:

$$m = \frac{\pi}{9\sqrt{2}} \approx 0,247. \quad (1)$$

При аэрации разрушающихся волн, где вовлечение в жидкость пузырьков воздуха происходит за счет действия пульсационных составляющих скоростей, трудно вообразить возможность столь плотной упаковки пузырьков. Теоретическими исследованиями применительно к определению пористости осадочных пород [9], составленных из сферических частиц, установлен интервал значений пористости от $m = 0,26$ до $m = 0,47$ от общего объема. При случайной наброске одинаковых шаров статистически наиболее вероятное число контактов между соседними шарами равно 8, которому соответствует пористость 0,42 [10].

Аналогичные оценки можно получить, используя результаты систематических опытов по исследованию пористости структуры, образованной из шаров диаметра d , случайным образом набросанных в цилиндр диаметра D . При соотношении $D/d > 2,5$, представляющем интерес применительно к разрушающимся волнам, объемная концентрация может быть вычислена с приемлемой точностью по формуле Азрова (см. [11]):

$$\frac{1-m}{[(N-1)/N]^2} = 0,61 + 0,288 \left[\left(\frac{N}{N-1} \right)^2 - \left(\frac{N-2}{N-1} \right)^2 \right], \quad (2)$$

согласно которой $m = 0,46$ при $N = D/d = 3,5$ и $m = 0,42$ при $N = 7$, что соответствует значениям $A = 1 - m$ от 0,54 до 0,58.

Таким образом, в предположении, что все пузырьки воздуха имеют одинаковый диаметр, ожидаемое предельное содержание воздуха в разрушающейся волне $A = 0,58$. При наличии пузырьков разного диаметра возможно увеличение воздухосодержания до $A = 0,75$. При содержании воздуха более 75 % газожидкостная смесь превращается в пену. Предел существования газожидкостной смеси совпадает с пределом плотной упаковки соприкасающихся газовых пузырей шаровой формы (при большем содержании газа в жидкости смесь приобретает полиэдрическую структуру).

Опубликованных данных об аэрации разрушающихся волн мало. Объемное воздухосодержание реальных разрушающихся волн по разным оценкам варьирует в пределах $A = 0,3 - 0,6$. Данные каких-либо инструментальных натурных измерений аэрации разрушающихся волн нам не известны.

Теоретические основы измерения содержания воздуха в водовоздушной смеси содержатся в работах, посвященных описанию приборов для измерения аэрации [12, 13]. Эти приборы реализуют связь между удельной проводимостью водовоздушной смеси и долей газовой фазы по формуле Максвелла, полученной для невзаимодействующих сфер одинакового размера с нулевой проводимостью, равномерно распределенных в сплошной среде:

$$K_{\text{см}} = K_0 [1 - 3\alpha / (2 + \alpha)], \quad (3)$$

где K_0 – удельная проводимость сплошной среды (в данном случае воды), $K_{\text{см}}$ – удельная проводимость смеси, α – содержание газовой фазы.

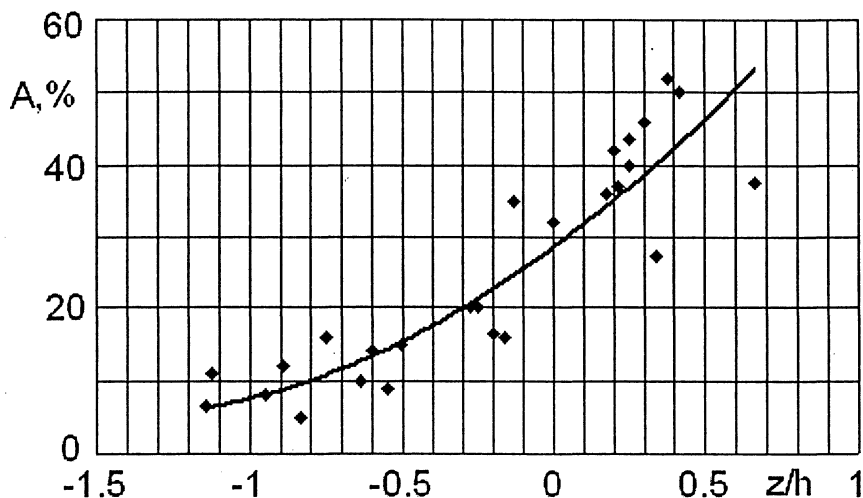
Автором для измерений аэрации в приборе использовались приборы, выполненные по схемам, описанным в работах [12, 13]. Ввиду слабой нелинейности зависимости (3) в схеме предусмотрено дополнительное сопротивление, обеспечивающее линейную зависимость активной проводимости от измеряемой величины. Связь тока в цепи датчика с концентрацией водовоздушной смеси в исследуемой точке потока при введении линеаризующего сопротивления имеет вид [11]

$$1 - C = 1,5(R_0 / U_{\Gamma}) I_{\text{д}}, \quad (4)$$

где C – концентрация смеси; R_0 – сопротивление воды; U_{Γ} – напряжение на выходе генератора; $I_{\text{д}}$ – ток в цепи датчика.

При измерениях использовались пластинчатые и штыревые датчики. Их сравнительные метрологические характеристики обсуждаются в работе [14]. Измерения проведены при исследовании давления прибойных волн на сооружения в волновом лотке Днепродзержинского отделения ВНИИГ, имеющем длину 100 м, ширину 4 м при рабочей глубине наполнения до 6 м. Пневматический генератор волн позволял воспроизводить периодические волны высотой до 1,8 м.

Аэрация волн, трансформирующихся в прибойной зоне. Измерения проводились при трансформации исходных волн на откосе с уклоном 1:100. Высота исходных волн изменялась от 0,75 до 1,56 м. Период волн варьировал от 2,9 до 4,8 с. Отношение h/H (h – высота волны, H – глубина жидкости у стенки) в створах измерений изменялось от 0,75 до 0,35, что позволило охватить зону существования прибойных волн от начала разрушения до почти полной деаэрации. Измерения проводились на разных уровнях над и под уровнем спокойной воды. Осредненные результаты измерений по 10 последовательным трансформирующимся прибойным волнам приведены на рис. 1.



Р и с. 1. Эпюра распределения азрации по глубине (z – положение точки измерения относительно уровня спокойной воды; h – высота волны; A , % – содержание воздуха в волне)

Максимальное содержание воздуха, равное 52 %, зафиксировано на уровне, примерно равном половине высоты волны в начале обрушения, при $h/H = 0,68$ и высоте прибойной волны $h = 0,65$ м. По мере удаления от критической глубины и уменьшения высоты прибойной волны максимальное содержание воздуха в ее гребне уменьшается. При $h/H = 0,52$ и высоте волны $h = 0,5$ м азрация снизилась до 37 %. Содержание вовлеченного воздуха в процентах уменьшается по глубине по полиномиальной зависимости

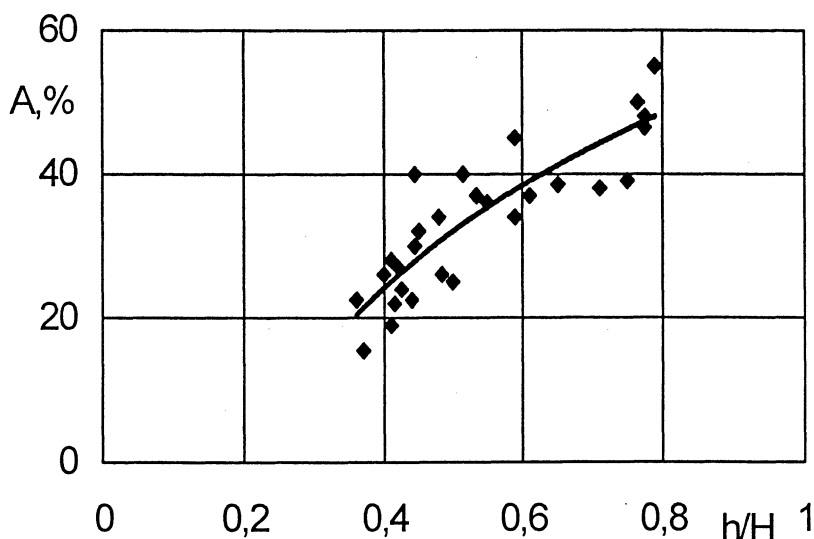
$$A = 27,8703 + 46,1374(z/h) + 27,541(z/h)^2, \quad (5)$$

где z – положение точки измерения относительно уровня спокойной воды. Коэффициент корреляции равен 0,96. Стандартное отклонение от среднего достигает 4,36 %. Измеренная азрация прибойных волн на уровне спокойной воды не превысила 35 %. На глубине от спокойного уровня воды, равной 1,2 высоты прибойной волны, уровень азрации уменьшился до 5 %.

Для проверки наличия масштабного эффекта были проведены измерения азрации при постепенном разрушении исходных волн высотой до 30 см в остекленном волновом лотке. При этом максимальное содержание воздуха в пределах гребня волны не превысило 10 %. Примерно такое же содержание воздуха получено при определении азрации в гребне волны объемным способом. Визуально установлено, что до уровня дна проникают только одиночные пузырьки воздуха.

Азрация волны в непосредственной близости от сооружения. При взаимодействии прибойных волн с вертикальной стенкой образуется сильный всплеск. Естественно допустить, что захват воздуха при опадании сильного всплеска должен в какой-то степени увеличить азрацию прибойной волны в

непосредственной близости от стенки. В специально проведенной серии опытов датчик азрации крепился к вертикальной стенке перпендикулярно к ней на 10 см ниже уровня спокойной воды. На стенку действовали прибойные волны, образующиеся при трансформации исходных регулярных волн на подходе к сооружению. Результаты измерений приведены на рис. 2. Каждая из нанесенных точек представляет величину, осредненную по 10 первым волнам, действующим на сооружение. На уровне измерений максимальное содержание воздуха до 55 % соответствовало отношению $h/H = 0,75 - 0,8$. Минимальное значение азрации 20 % соответствовало отношению $h/H = 0,37$.



Р и с. 2. Азрация прибойных волн у вертикальной стенки (h – высота волны; H – глубина у стенки; A , % – содержание воздуха в волне)

Зависимость азрации в точке измерений от h/H близка к логарифмической:

$$A = 35,031 \ln(h/H) + 56,275. \quad (6)$$

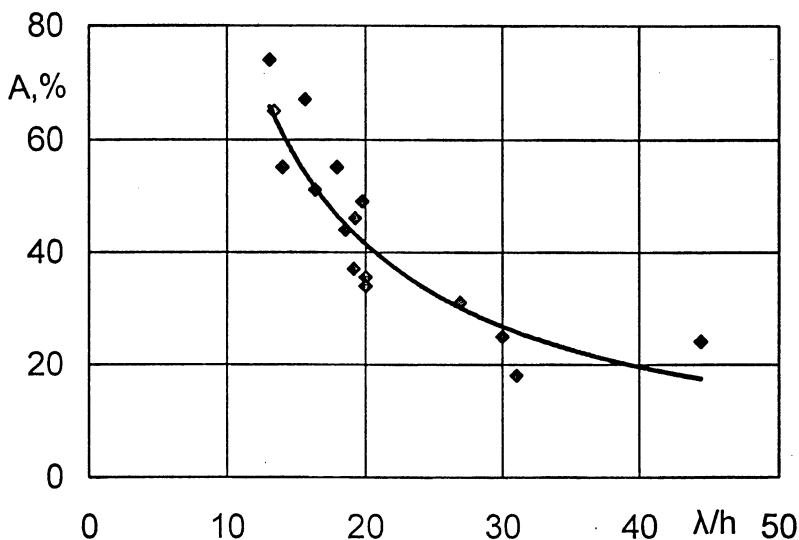
Коэффициент корреляции для осредненных значений азрации равен 0,87. Как видно на рис. 1, при отсутствии сооружения на этой глубине азрация не превышала 35 %. По данным контрольных измерений на удалении 8 м от стенки, примерно равном длине прибойной волны, увеличения азрации из-за всплеска у стенки не обнаружено.

Азрация в зоне удара волн, разрушающихся на откосах сооружений. Азрация в зоне удара складывается из азрации гребня обрушающейся волны и азрации отката предшествующей волны. Измерения азрации при ударе волн проводились на двух моделях крепления откоса. Крепление откосов было выполнено из железобетонных плит, уложенных на песчаный откос по тон-

кому слою песчано-гравийной подготовки. Первая модель имела берму шириной 2,5 м и верховой откос с уклоном 1:3. Вторая модель имела берму шириной 5 м и верховой откос 1:2,5. Во всех опытах глубина на берме превышала 2 высоты волны на подходе к берме.

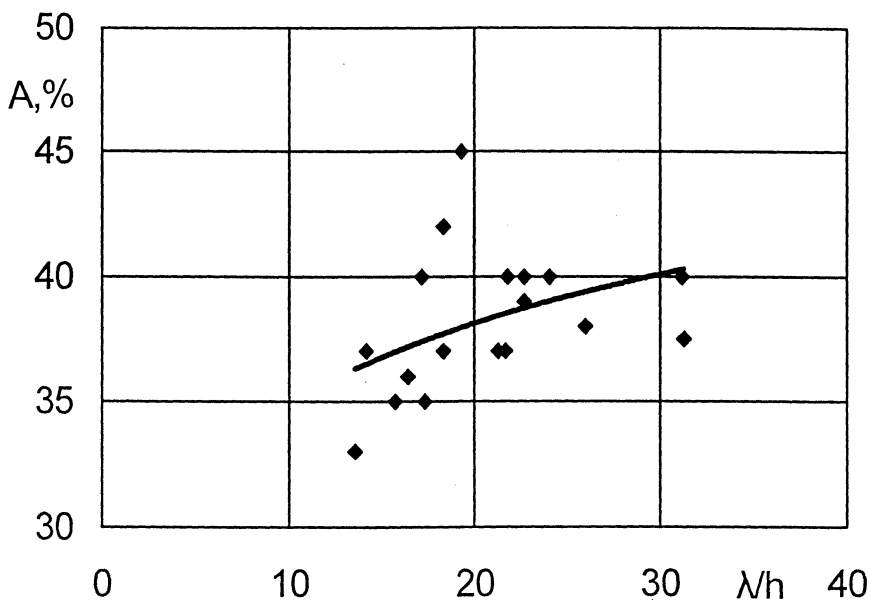
В опытах на откосе с уклоном 1:3 измерения аэрации проводились прибором ЛПИ с пластинчатым датчиком, закрепленным на удалении 2 см от поверхности откоса. В опытах на откосе 1:2,5 использовался прибор конструкции ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева со штыревым датчиком, установленным перпендикулярно поверхности откоса. В последнем случае конструкция крепления позволяла производить перемещение датчика аэрации вдоль откоса и изменять его высотное положение. В ходе опытов непрерывно регистрировались параметры волны на подходе к сооружению, аэрация волны и давление в зоне удара. Визуально определялись и фиксировались места удара, створы и отметки максимального поднятия гребня, минимального уровня подошвы волны перед обрушением, максимальных наката и отката.

Результаты измерений аэрации в зоне удара волн об откосы с уклонами 1:3 и 1:2,5 приведены на рис. 3, 4 соответственно.



Р и с. 3. Аэрация в зоне удара волны об откос с уклоном 1:3 (h – высота волны; λ – длина волны; $A, \%$ – содержание воздуха в волне)

На откосе 1:3 удар обрушающегося гребня волны происходит в откат предшествующей волны. Максимальное содержание воздуха в зоне удара по измерениям достигало 75 % при крутых исходных волнах $\lambda/h = 14$ (λ – длина волны), минимальная аэрация 26 % зафиксирована при ударе пологих волн $\lambda/h = 44$.



Р и с. 4. Аэрация в зоне удара волны об откос с уклоном 1:2,5 (h – высота волны; λ – длина волны; $A, \%$ – содержание воздуха в волне)

На относительно крутом откосе 1:2,5 преобладают процессы отражения, и к моменту удара следующей волны откат предыдущей волны уже завершается. При этом средний процент аэрации от крутизны исходных волн зависит мало. Осредненное значение аэрации при ударе волны об откос по многим измерениям изменяется от 32 до 40 %.

Заключение. Проведены измерения аэрации прибойных волн в процессе их трансформации на пологом берегу, вблизи от вертикальной стенки и в зоне удара при разрушении волн на крутых откосах. Эксперименты проведены в волновом лотке с прибойными волнами высотой более 50 см, что позволило работать за пределами влияния масштабного эффекта. Для измерений использованы приборы, разработанные для изучения аэрации в высокоскоростных потоках, в частности при гидравлическом прыжке, возникающем при сопряжении бьефов ГЭС и на водосливах плотин. Получены эпюры распределения аэрации по глубине разрушающихся волн. Установлено, что значения аэрации не превышают 58 % – предела, определенного при исследованиях максимальной пористости наброски из шаров одинакового диаметра. Такая аэрация возможна в гребне крутых волн при начале разрушения. По мере трансформации волны на склоне уменьшается ее высота и максимальная аэрация гребня. Максимум аэрации расположен примерно посередине высоты волны. Ниже аэрация уменьшается по полиномиальной зависимости. До дна обычно доходят единичные пузырьки, вовлекаемые при вхождении гребня разрушающейся волны в воду. При воздействии прибойных волн на вертикальную стенку образуется высокий раздробленный всплеск, при опадании

которого в воду дополнительно вовлекается воздух, что приводит к увеличению аэрации. При этом увеличивается и содержание воздуха в придонных слоях воды перед стенкой. Получены данные об аэрации в месте удара волн, разрушающихся на откосах сооружений, имеющих уклон 1:3 и 1:2,5. Максимальная зафиксированная аэрация при ударе волн об откос 1:3 составила 75 %. Аэрация при ударе волн об откос 1:2,5 достигала 45 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Oumeraci H., Partensky H.W. Breaking wave impact loading of vertical structures-effect of entrapped air on structure response // *Rosprawy Hydrotechniczne*. – 1992. – Z. 55. – P. 207 – 229.
2. Монин А.С., Красицкий В.П. Явления на поверхности океана. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 375 с.
3. Беззаботнов В.С., Бортковский Р.С., Тимановский Д.Ф. О структуре двухфазной среды, образующейся при обрушениях ветровых волн // *Изв. АН СССР. ФАО*. – 1986. – 22, № 11. – С. 1186 – 1193.
4. Baldy S., Borguel M. Bubbles between the wave trough and wave crest levels // *J. Geophys. Res.* – 1987. – 92, № C3. – P. 2919 – 2929.
5. Longuet-Higgins M. Recent development in the study of breaking waves // *Proc. Fifteenth Coast. Eng. Conf.* – Honolulu, 1976. – 1. – P. 441 – 459.
6. Рябых В.М. Масштабные поправки при моделировании волновых воздействий на откосы гидротехнических сооружений // *Тр. координационных совещаний по гидротехнике*. – Л.: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 1969. – Вып. 50. – С. 700 – 705.
7. Давлетшин В.Х. Масштабные эффекты при исследованиях давления и заплеска прибойных волн // *Физическое и математическое моделирование гидравлических процессов при исследовании крупных гидроузлов комплексного назначения*. – Л.: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 1990. – С. 71 – 80.
8. Богоявленский Р.Г. Гидродинамика и теплообмен в высокотемпературных ядерных реакторах с шаровыми ТВЭЛами. – М.: Атомиздат, 1978. – 112 с.
9. Гриффитс Дж. Научные основы исследования осадочных пород. – М.: Мир, 1971. – 422 с.
10. Кандауров И.И. Механика зернистых сред и ее применение в строительстве. – М.: Стройиздат, 1966. – 320 с.
11. Иошпе М.Н., Корнилов Г.Г. Оценка предельного содержания газов в двухфазных газожидкостных потоках с пузырьковой структурой // *Нефть и газ*. – 1981. – № 7. – С. 50 – 54.
12. Троицкий В.П., Кокорин Ю.В., Гутников В.С. и др. Прибор для измерения воздуходождения в аэрированных водных потоках // *Изв. ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева*. – 1970. – 92. – С. 350 – 359.
13. Гутников В.С., Селянинов М.Г. Прибор для измерения степени аэрации потока электропроводной жидкости // *Тр. координационных совещаний по гидротехнике*. – Л.: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 1970. – Вып. 51. – С. 169 – 176.
14. Кокорин Ю.В., Троицкий В.П. Исследование метрологических характеристик бифилярных, пластинчатых и штыревых датчиков аэрации // *Тр. ЛПИ*. – 1984. – № 401. – С. 15 – 22.

Научно-исследовательский отдел Производственной
строительно-монтажной компании «Днепр».
г. Днепропетровск

Материал поступил
в редакцию 23.11.05
После доработки 25.01.06

ABSTRACT Results of measurements of aeration of waves transformed in the breaking zone, and also aeration of breaking waves effecting vertical and slope constructions are represented. The measurements are carried out in a big wave shoot outside the influence of the scale effect using the devices for measuring conductivity of water-air mixtures.