

нию силы Архимеда:

$$F = -\Delta\rho Vg = -\frac{d\rho}{dh} xVg.$$

Уравнение движения этого объема

$$\rho Vx'' = -\frac{d\rho}{dh} Vgx$$

представляет собой уравнение гармонических колебаний с частотой

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{\rho} \frac{d\rho}{dh}}.$$

Если градиент плотности по каким-то причинам оказывается очень маленьким, то необходимо учитывать изменение объема сместившейся жидкости за счет изменения давления. Принято эту поправку выражать через скорость звука c в воде (которая также определяется ее сжимаемостью):

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{\rho} \frac{d\rho}{dh} + \frac{g^2}{c^2}}.$$

(Проверьте сами, что в этой формуле все в порядке с размерностью.) Обычно второй член гораздо меньше первого, и его можно отбрасывать. Выражение для частоты ω было получено в 20-х годах почти одновременно и независимо финским геофизиком В.Вяйсяля и англичанином Д.Брентом. С тех пор частота эта носит их имена.

Благодаря тому, что вертикальный градиент плотности морской воды обычно невелик (за исключением редких экзотических случаев – таких, как «мертвая вода»), малы и силы, препятствующие смещению частиц воды из положения равновесия. Именно поэтому амплитуды внутренних волн могут достигать десятков, а иногда и сотен метров. Периоды свободных внутренних волн, соответствующие значениям частот Вяйсяля–Брента, могут принимать значения от нескольких минут в верхних слоях до нескольких часов в глубине. Несмотря на то, что такие огромные смещения на сотни метров за сравнительно короткое время происходят где-то в толще вод и на поверхности никаких катастроф в это время не происходит, внутренние волны с такими большими амплитудами далеко не безобидны. Вот тому пример.

11 апреля 1963 года все информационные агентства мира передали

экстренное сообщение о гибели во время испытательного рейса атомной подводной лодки ВМС США «Трешер».

«Трешер» (по-английски «молотилка») – головная из серии атомных подводных лодок ВМС США. Водоизмещение 4300 т, длина 85 м, ширина 9,6 м, предельная глубина погружения 400 м. Скорость хода в надводном положении 16 узлов (30 км/ч), в подводном – до 30 узлов (55 км/ч).

Поскольку рейс был испытательный, после ремонта в порту Портсмут, на борту помимо 16 офицеров и 96 матросов находились еще 17 инженеров и техников Портсмутских доков. Связь с «Трешером» прекратилась через два часа после начала первого испытательного погружения. Предполагаемое место гибели «Трешера» находилось недалеко от выхода из залива Мэн на глубине около 3000 м. Поиски погибшей лодки, так же, как и выяснение причин катастрофы, были организованы очень быстро и с размахом. Однако только к осени 1963 года вырисовалась одна из возможных причин катастрофы, высказанная американским океанологом К.Айзлином из Вудс-Холского океанографического института, расположенного в непосредственной близости от залива Мэн. Оказалось, что в начале апреля, за несколько дней до катастрофы, в этом районе был зарегистрирован сильный шторм, центр которого 8–10 апреля сместился на северо-восток и находился уже над заливом Св.Лаврентия. Индуцированные этим штормом внутренние волны могли к моменту гибели «Трешера» оказаться у выхода из залива Мэн (по оценкам, скорость распространения этих волн ~ 3 м/с). Анализ местных гидрометеорологических условий дает все основания предполагать, что эти внутренние волны имели амплитуду до 100 м, длину волны 1–2 км и период около 8 минут. К сожалению, во время катастрофы никаких гидрологических наблюдений не велось, и поэтому приведенные соображения носят предположительный характер. Однако можно себе представить ситуацию, что «Трешер» в какой-то момент попал на гребень подобной внутренней волны и затем за полпериода, т.е. за 4 минуты, опустился на 200 м! Непредусмотренное заранее столь быстрое погружение мог-

ло оказаться роковым для «Трешера». Точная причина катастрофы так и не была установлена.

Обычные волны на поверхности морей и океанов также можно рассматривать как внутренние волны на поверхности раздела двух сред разной плотности – воды и воздуха. В этом случае вертикальный градиент плотности очень велик, и поэтому на поверхности, к счастью, очень редки волны высотой более 10 м. Кстати, если рассматривать волны на поверхности как внутренние, то можно представить некий аналог явления «мертвой воды» и объяснить, почему скорость подводной лодки в надводном положении почти в два раза меньше, чем в подводном. В надводном положении существенная часть энергии двигателя лодки расходуется на образование волн на поверхности раздела вода – воздух, а в подводном положении в среде, где вертикальные градиенты плотности малы, возникающие при движении внутренние волны отбирают на себя меньшую часть энергии двигателя.

Следует также отметить, что интенсивные внутренние волны весьма способствуют перемешиванию вод и, тем самым, обогащению их кислородом и питательными веществами. Отсюда недалеко и до оценки перспектив рыбного промысла в данном районе.

Одним словом, важность исследований внутренних волн как для надводного, так и для подводного мореплавания очевидна. И самое главное, с нашей точки зрения, – это же очень интересно! Человек разумный должен интересоваться тем, что творится в окружающей его природе.

Оказывается, определение параметров внутренних волн по данным океанографических наблюдений сопряжено с определенными трудностями. Еще несколько лет назад ученые судили о высоте внутренних волн по показаниям прибора, регистрирующего, например, температуру воды на некоторой глубине. В этом случае изменение температуры за промежуток времени, сравнимый с периодом внутренних волн, позволяет судить об их амплитуде. В самом деле, если ΔT – упомянутая разность температур, а dT/dh – ее вертикальный градиент, то амплитуда равна

$$A = \frac{1}{2} \frac{\Delta T}{dT/dh}.$$