

ТАК ПОЧЕМУ ВОДА ОКЕАНОВ НЕ «СТЯГИВАЕТСЯ» К ЭКВАТОРУ?

© Верин О.Г.

Контакт с автором verinOG@list.ru

Для меня этот вопрос никогда не возникал, и подробно разбирать его не было необходимости. Однако в виде небольшой реплики есть смысл это сделать, так как в дискуссиях влияние центробежной силы, связанной с вращением Земли, не всегда удается объяснить достаточно кратко и ясно.

Для того чтобы нагляднее представить механизм явления, рассмотрим влияние вращения Земли на уровень воды в океанах в зависимости от широты (в том числе, на экваторе), используя два разных способа расчета.

1. Поверхность воды в равновесном состоянии.

Поверхность воды в равновесном установившемся состоянии должна быть перпендикулярна действующей на воду результирующей силе. Это утверждение достаточно очевидно, так как, предположив обратное, нетрудно прийти к выводу, что вода начнет *ускоренное движение* в ту сторону, куда отклоняется от вертикали эта равнодействующая сила, чтобы восстановить равновесие.

Это же правило действовало бы и в отсутствии вращения Земли. Поверхность воды имела бы идеальную форму сферы, так как эта поверхность всюду перпендикулярна к центрально симметричной силе тяжести.

Вращение Земли достаточно медленное, и поэтому его влияние можно рассматривать как *слабое возмущение* сферической формы. Чтобы в этом убедиться сравним максимальную центробежную силу на экваторе с силой тяжести, действующей на единицу объема воды (γ поверхности):

$$\frac{F_c}{P} = \frac{\rho \omega^2 R}{\rho g} = \frac{\omega^2 R}{g} \approx \frac{(0,727 \cdot 10^{-4})^2 6,37 \cdot 10^6}{9,8} \approx 3,4 \cdot 10^{-3}.$$

Здесь ρ – плотность воды; ω - угловая скорость вращения Земли; R - средний радиус Земли; g - ускорение свободного падения [1].

Итак, при равновесном состоянии проекции силы тяжести и центробежной силы на поверхность воды должны быть одинаковыми по величине и иметь противоположные направления (рис. 1).

Если обозначить через β очень малый угол (результат возмущения) между перпендикуляром к поверхности воды и направлением силы тяжести к центру Земли, то проекция силы тяжести на касательную плоскость будет равна

$$P_s = P \sin \beta = \rho g \sin \beta. \quad (1)$$

С другой стороны, проекция центробежной силы, действующей вдоль поверхности воды, приближенно (без учета очень малых поправок) равна

$$F_s \approx (\rho \omega^2 R \cos \varphi) \cdot \sin \varphi. \quad (2)$$

Здесь – φ широта, на которой рассматривается действие сил.

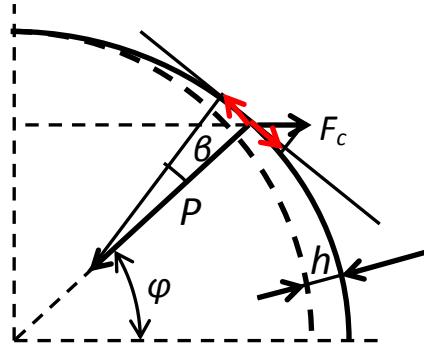


Рис. 1. Проекции силы тяжести и центробежной силы на поверхность воды уравнивают друг друга.

Эти проекции сил должны уравновесить друг друга:

$$P_s = F_s, \quad \rho g \sin \beta \approx \rho \omega^2 R \cos \varphi \sin \varphi, \quad \sin \beta \approx \frac{\omega^2 R}{g} \cos \varphi \sin \varphi. \quad (3)$$

Так как сила тяжести почти на три порядка превышает центробежную силу, то угол β действительно очень мал.

Выражение (3) для угла β полностью определяет «отклонение» формы поверхности воды от сферы.

Действительно, с достаточной степенью приближения можно записать в полярной системе координат

$$\sin \beta \approx \operatorname{tg} \beta = \frac{dh}{R d\varphi} \approx \frac{\omega^2 R}{g} \cos \varphi \sin \varphi. \quad (4)$$

h – расстояние между поверхностью воды и воображаемой сферой, имеющей радиус, равный «полярному» радиусу (рис. 1).

Интегрируя (4), получаем:

$$h \approx \int_{\varphi}^{\pi/2} \frac{\omega^2 R^2}{g} \cos t \sin t \cdot dt = \frac{\omega^2 R^2}{g} \int_{\varphi}^{\pi/2} \cos t \cdot d(-\cos t) = \frac{\omega^2 R^2}{2g} \cos^2 \varphi. \quad (5)$$

На экваторе ($\varphi = 0$) уровень (отклонение) поверхности воды максимален

$$h_0 \approx \frac{\omega^2 R^2}{2g} \approx 11 \text{ км}. \quad (6)$$

В реальности и экваториальный радиус, и полярный радиус являются геодезическими понятиями и зависят от многих факторов (неоднородность распределения пород, неровности поверхности земли и т.д.), однако полученное отклонение уровня воды (6) имеет правильный порядок величины.

На других широтах отклонение воды от «полярной» сферы меньше и оно изменяется как квадрат косинуса от широты (6).

2. Статическое давление как результат баланса сил.

Найдем величину отклонения поверхности воды h , вызванного вращением Земли, еще одним способом.

Определим давление воды на глубине h , используя при этом два разных пути подхода к рассматриваемой точке (рис. 2).

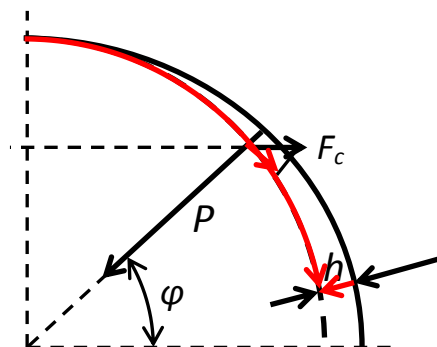


Рис. 2. Два разных пути для расчета давления воды в одной и той же точке.

Первый путь – от полюса по воображаемой поверхности сферы, имеющей «полярный» радиус. Расчет давления по этому пути определяется только центробежной силой и не будет включать в себя силу гравитации, так как она все время перпендикулярна к направлению перемещения:

$$\Delta p_1 \approx \int_{\varphi}^{\pi/2} \rho \omega^2 R \cos \varphi \sin \varphi \cdot R d\varphi = \frac{\rho \omega^2 R^2}{2} \cos^2 \varphi. \quad (7)$$

Этот интеграл практически повторяет (5).

Осталось приравнять это давление (7) величине, определяемой при движении по второму пути - от поверхности воды к центру на глубину h :

$$\Delta p_1 = \Delta p_2 \approx \rho g h, \quad h \approx \frac{\omega^2 R^2}{2g} \cos^2 \varphi. \quad (8)$$

Как и следовало ожидать, получился тот же результат (5).

3. Вместо заключения.

Столь простой расчет «отклонения» воды от сферической формы оказался возможным благодаря тому, что сила тяжести превосходит центробежную силу почти на три порядка.

Если же представить себе скорость вращения такой, что центробежная сила и сила тяжести будут иметь один и тот же порядок величины, то такая система будет на грани разрушения, а угловая скорость вращения будет равна:

$$\rho\omega^2 R \approx \rho g, \quad \omega \approx \left(\frac{g}{R}\right)^{1/2} \approx \left(\frac{9,8}{6,37 \cdot 10^6}\right)^{1/2} \approx 1,24 \cdot 10^{-3} (1/c). \quad (9)$$

По сравнению с существующей скоростью вращения - $0,727 \cdot 10^{-4} 1/c$ величина, определяемая (9), больше чем в 17раз. То есть, речь идет о скорости вращения Земли, при которой сутки были бы около 1 часа и 25 мин.

В этом случае скорость поверхности земли имела бы порядок величины так называемой первой космической скорости – 7,9 км/с. Сейчас скорость на экваторе составляет около 460 м/с.

Однако нашу планету ждет другая участь, так как влияние Луны приводит к замедлению вращения Земли [2]. Это будет происходить почти вплоть до полной остановки вращения, когда сутки увеличатся почти до 50 нынешних суток.

Литература

1. Яворский Б. М., Детлаф А. А. Справочник по физике. Главная редакция физ.-мат. литературы. - М.: Наука, 1985.
2. Верин О.Г. Луна и Земля: выяснение отношений.
<http://www.sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/13079.html>
<http://technic.itizdat.ru/docs/verin/FIL13787579610N723698001/1>