

ПОВТОРЯЕМ
ОПЫТ ГАСПАРО БЕРТИ

Все мы часто слушаем прогноз погоды и хорошо знаем, что атмосферное давление измеряется в миллиметрах ртутного столба. Когда писались эти строки, атмосферное давление в Москве равнялось 743 мм ртутного столба, в Риме – 758 мм, во Флоренции – 761 мм.

Иногда давление измеряют в миллиметрах или метрах водяного столба. Чтобы перейти от «ртутного» давления к «водяному», нужно первое из них умножить на 13,6. Например, сейчас в Риме давление составляет $13,6 \times 758$ мм рт. ст. ≈ 10309 мм вод. ст. $\approx 10,31$ м вод.ст. Коэффициент 13,6 появляется потому, что ртуть в 13,6 раз тяжелее воды.

Первым атмосферное давление измерил Эванджелиста Торричелли. В 1644 году он вместе с Вивиани провёл важнейший эксперимент. Метровую стеклянную трубку, запаянную с одного конца, заполнили ртутью, конец трубки закрыли пальцем и поместили в сосуд с ртутью. После того как палец убрали, часть ртути вылилась в сосуд, и ртуть в трубке установилась на высоте 76 см от уровня ртути в сосуде.

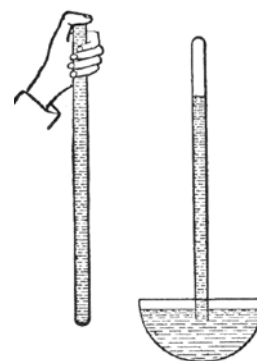


Рис. 1. Эксперимент Торричелли

Так что атмосферное давление во Флоренции в тот день не слишком отличалось от сегодняшнего. Вот что писал сам Торричелли по этому поводу:

На поверхность жидкости в чашке давит тяжесть 50 миль воздуха. Поэтому что же удивительного, если внутри стекла, где ртуть не испытывает ни влечения, ни сопротивления, поскольку там ничего нет, она стоит на таком уровне, что уравнивает тяжесть внешнего воздуха, оказывающего на неё давление! В такой же трубке, но значительно более длинной, вода стоит на высоте 18 локтей, то есть во столько раз выше ртути, во сколько раз ртуть тяжелее воды, для того чтобы уравновесить ту же самую причину, оказывающую давление и в том и в другом случае.

Так Торричелли установил наличие атмосферного давления. Он понял, что давление столба воздуха над нами такое же, как у столба ртути высотой 76 см или у столба воды высотой 18 локтей (это около 10 м). Он изобрёл первый барометр и впервые в лабораторных условиях создал вакуум – *торричеллиеву пустоту*, расположенную в верхней части трубки на рисунке 1.

Что касается трубки, заполненной водой на высоту 18 локтей, которую упоминает Торричелли, то это о римских экспериментах Гаспаро Берти, проведённых им около 1640 года. Берти использовал свинцовую трубу длиной больше 11 м. Сначала её заполняли водой и оба конца закупоривали.



Рис. 2. Более поздний эксперимент Берти с продвинутым дизайном

Затем трубу ставили вертикально, её нижний конец помещали в сосуд с водой и открывали. Часть воды из трубы выливалась, высота столба оставшейся в трубе воды была порядка 10 м. (Попробуйте придумать, как бы вы измерили высоту столба воды в непрозрачной свинцовой трубе; каким способом воспользовался Берти, нам неизвестно.)

Хоть Берти и предполагал наличие вакуума в верхней части трубы, он не смог доказать этого, да это было и не совсем верно. На самом деле пространство над уровнем воды в трубе было заполнено насыщенным водяным паром.

Подробнее об истории этих экспериментов и связанных с ними обстоятельствах читайте в тексте «Картезианский водолаз» на сайте «Квантика» kvantik.com/diver.pdf

Давайте воспроизведём эксперимент Берти, ограничившись более скромными, подручными материалами, на лестнице в вашем подъезде.





Вместо тяжёлой свинцовой трубы возьмите прозрачную ПВХ-трубку длиной 11 м с внутренним диаметром 6 мм и толщиной стенок 2 мм – стенки должны быть толстыми, чтобы верхнюю часть трубки не сдавило атмосферное давление. Ещё вам понадобятся две небольшие струбцины. Трубку заполните подкрашенной водой, на это уйдёт чуть больше 0,3 л. После заполнения самые кончики трубки сложите вдвое и сгибы зажмите струбцинами, обеспечив герметичность объёма внутри трубки (рис. 3).

Один конец трубки вместе со струбциной поместите в сосуд с водой (рис. 4), другой поднимите на всю длину трубки – больше 10 м, то есть на три этажа с лишним.

В трубке может остаться немного воздуха, например, в виде пузырьков, прилипших к стенкам. Чтобы его удалить, сначала простучите трубку пальцем по всей высоте снизу вверх. Тогда весь этот воздух поднимется к верхнему концу трубки. После этого открутите верхнюю струбцину, снова сложите вдвое трубку чуть ниже верхнего уровня воды в ней и зажмите сгиб.

Теперь можно разгерметизировать нижний конец трубки, находящийся в сосуде.



Рис. 3. Трубка заполнена подкрашенной водой, концы зажаты струбцинами

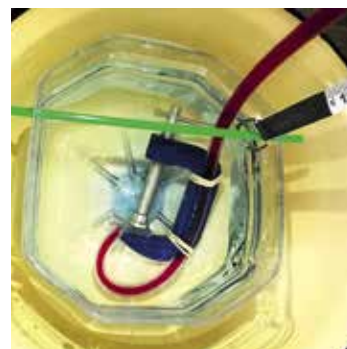


Рис. 4. Одна струбцина погружается в сосуд, нулевая отметка рулетки совмещается с поверхностью воды

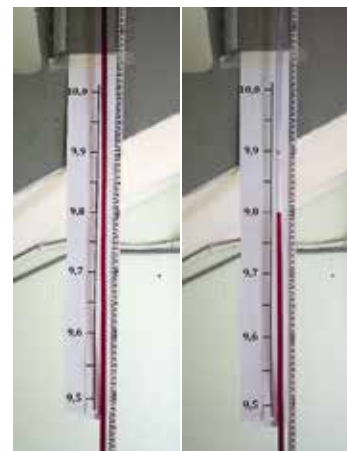


Рис. 5. До разгерметизации трубка заполнена доверху, после – уровень воды снижается до 9,8 м

При этом часть воды из трубки выльется в сосуд, оставшаяся установится на высоте примерно 10 м. В нашем эксперименте это было 9,8 м (рис. 5, справа).

На самом деле атмосферное давление на месте эксперимента в тот момент было 740 мм рт. ст., то есть $13,6 \times 740$ мм рт. ст. = 10064 мм вод. ст. $\approx 10,06$ м вод.ст.

Это кажется достаточно далёким от полученных нами 9,8 м. Но если учесть давление насыщенных паров воды, заполняющих верх трубки, а при температуре 20 °С оно составляет 23,6 см вод. ст., то теоретически предсказанное значение высоты водяного столба уменьшится до $10,06 - 0,24 = 9,82$ м вод. ст., что намного ближе к нашим экспериментальным 9,8 м.

В эксперименте Торричелли таких проблем не возникает – ведь давление насыщенных паров ртути при комнатной температуре составляет всего лишь 0,0013 мм рт. ст., практически 0. Так что ртутный барометр очень точно показывает значение атмосферного давления, а в верхней части трубки на рисунке 1 действительно глубокий вакуум – торричеллиева пустота.

Чтобы было легче ориентироваться в проделанных нами расчётах, приводим таблицу соответствия высот ртутного и водяного столбов и значения давлений насыщенных паров воды и ртути при 20 °С. Они пригодятся и для ваших собственных опытов и расчётов.

Высота ртутного столба	Высота водяного столба	Давление насыщенных паров при 20 °С	
1 мм	1,36 см	<i>ртути</i>	<i>воды</i>
760 мм	10,33 м	0,0013 мм рт.ст.	23,6 см вод.ст.
750 мм	10,20 м		
740 мм	10,06 м		
730 мм	9,92 м		

И ещё один полезный факт: на небольших высотах над уровнем моря (скажем, до 500 м) при подъёме на каждые 12 метров атмосферное давление уменьшается примерно на 1 мм ртутного столба. Вы можете проверить это, захватив с собой барометр и поднявшись с ним на последний этаж своего дома. Посмотрите, насколько давление там ниже, чем на первом этаже.

Художник Мария Усеинова

