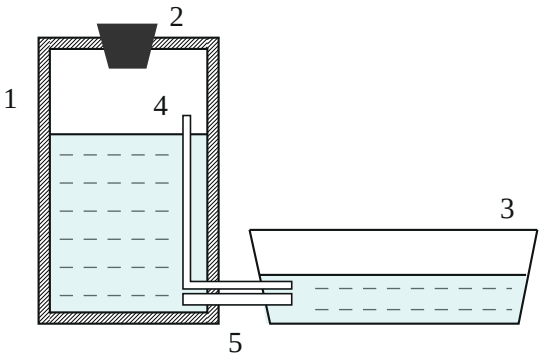
Вакуумная автопоилка

Задача 1. [ИОШ 2016/17, отборочный этап, 9 класс, задача 1] На рисунке показана схема вакуумной автопоилки, используемой для животных (кур, кроликов и др.) на фермах. Поилка состоит из резервуара для воды (1), закрытого плотной пробкой (2), корытца, из которого пьют воду животные (3), и двух трубок — изогнутой (4) и прямой (5). Вода в такой поилке перетекает из резервуара в корытце постепенно по мере освобождения корытца. Объясните принцип работы автопоилки.



▲ **Решение. Что происходит.** Резервуар закрыт пробкой, и воздух может попасть в него только через трубку 4, нижний конец которой опущен в корытце. Пока этот конец под водой, воздух в резервуар не входит, и над водой в резервуаре давление меньше атмосферного: атмосфера давит на воду в корытце и удерживает высокий столб воды в резервуаре. Корытце опустело до конца трубки 4 — воздух проходит в резервуар, и вода вытекает, пока снова не закроет трубку. Ключевой закон — условие равновесия жидкости: давление в покоящейся воде на одном уровне одинаково и растёт с глубиной на $\rho g h$.

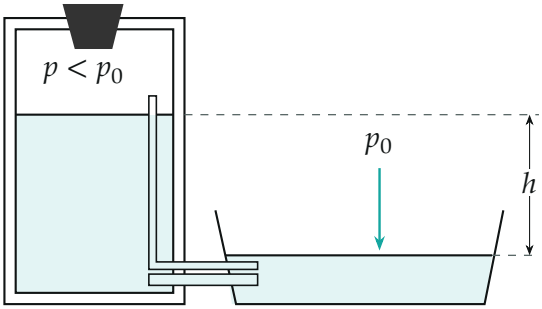
Обозначения. p_0 — атмосферное давление; p — давление воздуха под пробкой; ρ — плотность воды; h — разность уровней воды в резервуаре и в корытце.

1. Равновесие: почему вода не вытекает. Пусть конец трубки 4 в корытце под водой. Резервуар и корытце соединены трубкой 5 и образуют

сообщающиеся сосуды, но над водой в них разные давления: в корытце p_0, в резервуаре p. Давление на уровне воды в корытце внутри воды одно и то же (вода покоится и связана трубкой 5). Считая от поверхности в резервуаре,

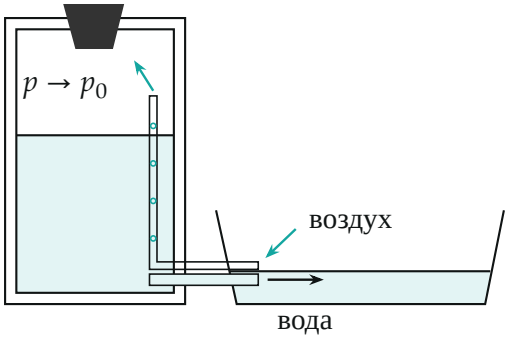
$$p + \rho g h = p_0 \quad \Rightarrow \quad p = p_0 - \rho g h < p_0.$$

Это и есть «вакуум» в названии: воздух под пробкой разрежён, и атмосферное давление, действующее на воду в корытце, удерживает в резервуаре столб воды на высоте h над уровнем корытца. Для $h = 30$ см разрежение $\rho g h \approx 3$ кПа, всего 3 % от атмосферного; атмосфера могла бы удержать столб до 10 м.



Равновесие: конец трубки 4 закрыт водой корытца. Под пробкой давление $p = p_0 - \rho g h$; в трубке 4 вода стоит на том же уровне, что и в резервуаре, — над ней тот же воздух с давлением p.

2. Корытце опустело: вода перетекает. Животные пьют, уровень в корытце опускается и открывает конец трубки 4. Теперь воздух резервуара через трубку 4 соединён с атмосферой. Вода из трубки 4 сливается в корытце, по ней пузырьками идёт воздух, верхний конец трубки выше уровня воды в резервуаре — воздух выходит прямо в пространство под пробкой, не пробулькивая через воду. Давление p под пробкой растёт к p_0, и равенство $p + \rho g h = p_0$ нарушается: давление внутри воды в резервуаре на уровне трубки 5 больше, чем в корытце, и вода по трубке 5 течёт в корытце.



Уровень в корытце опустился ниже конца трубки 4: воздух проходит по ней под пробку, давление там растёт, и вода через трубку 5 перетекает в корытце.

3. Вода снова закрыла трубку 4 — поток остановился. Как только уровень в корытце поднимется выше горизонтального участка трубки 4, её конец снова закрыт водой, воздух больше не входит. Вытекая дальше, вода чуть понижает уровень в резервуаре и тем самым снова создаёт разрежение под пробкой, пока не установится равновесие пункта 1 с новым, чуть меньшим h. Так уровень в корытце всё время держится около конца трубки 4, а резервуар отдаёт воду порциями, по мере того как животные пьют.

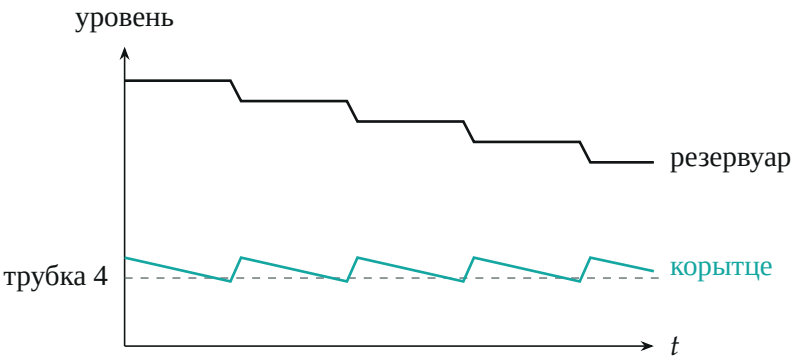


Схема работы во времени: в корытце уровень опускается, пока животные пьют, и подскакивает, когда конец трубки 4 открылся; в резервуаре уровень опускается ступеньками.

Обратите внимание. Без пробки поилка не работает: открытый резервуар и корытце — обычные сообщающиеся сосуды, и вода сразу выровнялась бы и перелилась через край корытца. Именно герметичность резервуара даёт разрежение $p < p_0$, которое держит воду.

Проверка. Предел: если бы конец трубки 4 был выше края корытца, воздух входил бы всё время и вода переливалась бы через край; если бы его совсем не было, вода не текла бы вовсе, пока животные не выпьют корытце до конца трубки 5. Оценка давления: разрежение в несколько килопаскалей атмосфера удерживает с большим запасом. Смысл: трубка 4 — это «датчик уровня», который впускает воздух ровно тогда, когда корытце надо долить.

Ответ. Пока нижний конец трубки 4 закрыт водой корытца, воздух в резервуар не попадает; давление под пробкой $p = p_0 - \rho g h$ меньше атмосферного, и атмосферное давление на воду в корытце удерживает воду в резервуаре. Когда уровень в корытце опускается ниже конца трубки 4, по ней в резервуар входит воздух, давление под пробкой растёт, и вода по трубке 5 перетекает в корытце, пока снова не закроет конец трубки 4.