

Сифон

Задача 1. [Республиканская олимпиада (Беларусь) 2025/26, 11 класс, экспериментальный тур, задача 1]

Приборы и оборудование: мензурка 250 мл, пластиковая бутылка 0,5 л, линейка 40 см, тонкая стеклянная трубка, гибкий силиконовый шланг с зажимом и с деревянным стержнем, штатив с лапкой, секундомер с памятью этапов, стакан 500 мл, салфетка дезинфицирующая, салфетка бумажная.

Внимание!

1. Будьте предельно аккуратны в работе — не разбейте стеклянную трубку — вторая трубка выдаваться не будет!
2. Если Вы пролили воду на стол — протрите его бумажной салфеткой.
3. Вам будет необходимо брать конец шланга в рот, поэтому регулярно протирайте его конец дезинфицирующей салфеткой.
4. В данном задании требуется (и будет оцениваться) точность измерений, корректность проведения обработки результатов и, конечно, понимание физических законов, описывающих проводимые эксперименты.

Рекомендации по подготовке установки.

1. В пробке бутылки проделаны отверстия, в которые вставляются стеклянная трубка и гибкий шланг. Для закрепления шланга внутри бутылки в вертикальном положении используется деревянный стержень. Положения трубки и шланга внутри бутылки можно регулировать, Вам необходимо регулярно заполнять бутылку водой. Просим Вас не спешить и быть аккуратным (чтобы не разбить трубку): чтобы открутить пробку с трубками, держите её одной рукой, а второй вращайте бутылку.
2. После того, как Вы налили в бутылку нужное количество воды, закрутите пробку, перекройте зажимом шланг и после этого закрепляйте бутылку в лапке штатива на нужной высоте. Чтобы вода начала выливаться, откройте зажим шланга (при необходимо-

сти можно продуть воздух в шланге).

3. Все измерения объёмов проводите только с помощью мензурки.
4. Измеряемые объёмы вытекающей воды должны быть не менее 200 мл. При проведении временных измерений используйте все 10 этапов памяти секундомера.
5. К секундомеру прилагается Инструкция по его использованию, при необходимости обращайтесь к организаторам за помощью.

Математическая подсказка. Если некоторая переменная величина $X(t)$ подчиняется уравнению

$$\frac{dX}{dt} = -aX, \quad (1)$$

где a — постоянный коэффициент, то зависимость этой величины от времени описывается функцией

$$X(t) = X_0 e^{-at} = X_0 \exp(-at), \quad (2)$$

где X_0 — значение функции $X(t)$ при $t = 0$.

Физическая подсказка. Расход жидкости (т. е. объём, который протекает через поперечное сечение трубки в единицу времени) пропорционален разности давлений на концах трубки (закон Пуазейля):

$$q = \frac{\Delta V}{\Delta t} = K (P_1 - P_2), \quad (3)$$

где K — коэффициент, зависящий от геометрических размеров трубки и вязкости протекающей жидкости. В данной работе давление измеряется в сантиметрах водяного столба (обозначайте $[P] = \text{см}$). Так как в данной работе используется одна трубка, а течёт только вода, то этот коэффициент остаётся постоянным.

Объём жидкости измеряйте в миллилитрах (мл), все расстояния в сантиметрах (см).

Часть 1. Предварительные измерения.

1.1 Измерьте длину трубки l .

Для дальнейших расчётов удобно ввести цилиндрические параметры

сосудов $b = \frac{\Delta z}{\Delta V}$, имеющих наглядный смысл: изменение уровня воды в сосуде Δz при изменении объёма на величину ΔV . Или — чему равна высота Δz столбика 1 мл воды в сосуде.

1.2 Проведите необходимые измерения и рассчитайте значения этих параметров: b_0 — для мензурки и b_1 — для бутылки. Укажите, какие величины вы непосредственно измеряли и по каким формулам рассчитали требуемые параметры.

Примечание. Измерять внутренние диаметры сосудов не рекомендуем.

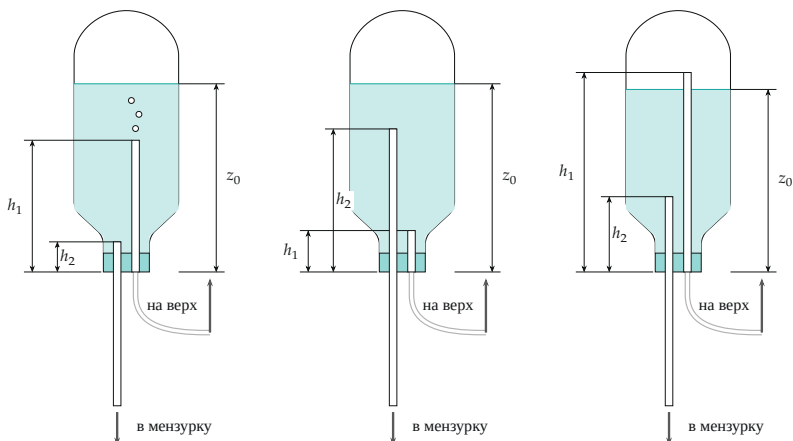
Погрешности измерения этих трёх величин рассчитывать не требуется, в дальнейших расчётах ими следует пренебрегать.

Используйте эти параметры, чтобы быстро оценивать, какой объём воды следует заливать в бутылку в каждом эксперименте.

Часть 2. Вытекание из бутылки.

В этой части вам необходимо исследовать вытекание воды из вертикально расположенной бутылки при различных расположениях трубки и шланга внутри бутылки. Во всех экспериментах свободный конец шланга прикрепляйте к верхней части штатива выше уровня воды в бутылке. Вода должна наливаться в мензурку, при этом нижний край трубки не должен касаться воды.

2.1 Расположите трубку и шланг внутри бутылки, как показано на левом рисунке. Все высоты измеряйте от нижнего края пробки.



Положения трубки и шланга в опытах 2.1, 2.2 и 2.3 (слева направо).

В данном эксперименте используйте следующие значения: высота уровня шланга $h_1 = 10,0$ см; высота уровня трубки $h_2 = 1,0$ см. Начальную высоту уровня жидкости z_0 подберите таким образом, чтобы в ходе вытекания 200 мл воды верхние концы шланга и трубки оставались в воде.

2.1.1 Укажите значение начального уровня воды в трубке z_0 .

2.1.2 Измерьте зависимость объёма вытекшей воды от времени $V(t)$. Постройте график полученной зависимости. Укажите формулу, описывающую полученную зависимость. Найдите численные значения параметров этой формулы.

2.1.3 Предложите теоретическую формулу, описывающую полученную зависимость $V(t)$.

2.1.4 Рассчитайте значения коэффициента K в формуле для данной трубки. Оцените его погрешность.

2.2 Измените положение трубки и шланга, как показано на среднем рисунке. Измерения проводите при следующих значениях высот: $h_1 = 2,0$ см; $h_2 = 11,0$ см.

2.2.1 Укажите значение начального уровня воды в бутылке z_0 .

2.2.2 Измерьте зависимость объёма вытекшей воды от времени $V(t)$. Постройте график полученной зависимости на том же бланке, что и в п. 2.1.2.

2.2.3 Предложите теоретическую формулу, описывающую полученную зависимость $V(t)$.

2.2.4 Рассчитайте значение коэффициента K в формуле для данной трубки. Оцените его погрешность.

2.2.5 Укажите, можно ли считать найденные значения K в п. 2.1.4 и 2.2.4 равными. Укажите, какое значение K Вы будете использовать в дальнейшем.

2.3 Ещё раз измените положения трубки и шланга, как показано на правом рисунке. Верхний край шланга всё время должен находиться в верхней части бутылки, заполненной воздухом.

Верхний уровень трубки установите на высоте $h_2 = 3,0$ см. Начальную высоту уровня воды z_0 подберите такой, чтобы после вытекания

200 мл уровень воды совсем немного превышал уровень трубки.

2.3.1 Укажите значение начального уровня воды в бутылке z_0 .

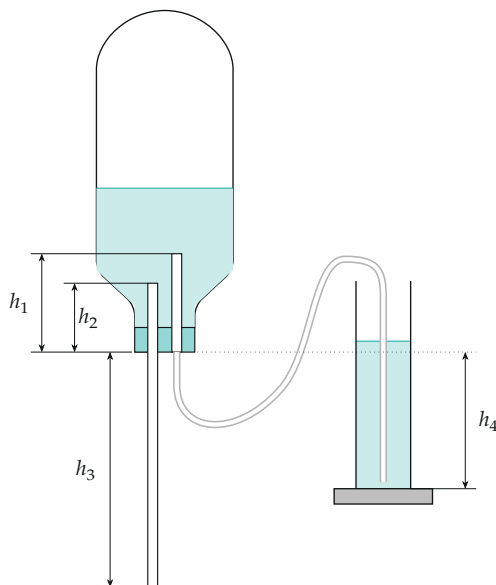
2.3.2 Измерьте зависимость объёма вытекшей воды от времени $V(t)$. Постройте график полученной зависимости. На отдельном бланке.

2.3.3 Рассчитайте на основании экспериментальных данных коэффициенты наклона (с погрешностями) сглаживающих прямых изменения объёма на участках: а) от 0 до 100 мл; б) от 100 до 200 мл. Укажите, можно ли считать полученную зависимость нелинейной.

2.3.4 Рассчитайте по найденным в п. 2.3.3 коэффициентам наклона значения коэффициента K . Рассчитывать погрешности в данном пункте не требуется.

Часть 3. Всасывание.

Измените положение трубок внутри бутылки: $h_1 = 3,0$ см; $h_2 = 6,0$ см. Расположите штатив таким образом, чтобы нижний конец стеклянной трубки находился рядом с краем стола и ниже его. Вода из трубки должна выливаться в большой пластиковый стакан, который Вы расположите на полу. Свободный конец шланга опустите в мензурку, он должен находиться у дна мензурки, закрепите шланг к верхнему краю мензурки. Разность высот $h_3 - h_4$ установите в пределах от 8 до 9 см.



Налейте в бутылку примерно 300 мл воды. Мензурку полностью заполните водой. Если теперь полностью заполнить шланг водой (для этого надо подсосать её через стеклянную трубку), то вода начнёт переливаться из мензурки в бутылку, а затем в стакан на полу.

В данном задании Вам необходимо исследовать изменение объёма воды в мензурке с течением времени $V(t)$. Этот объём измеряйте по шкале мензурки, учитывать объём погружённой части трубки не надо (подумайте на досуге, почему?). В начальный момент мензурка должна быть полностью заполнена.

Укажите в Листах ответов значения всех параметров установки h_1, h_2, h_3, h_4 .

3.1 Измерьте зависимость объёма воды в мензурке от времени $V(t)$. Постройте график полученной зависимости.

3.2 Выведите теоретическую формулу, описывающую зависимость объёма от времени $V(t)$.

3.3 Постройте линеаризованный график полученной экспериментальной зависимости, т. е. найдите такую функцию $Y(V)$, чтобы её зависимость от времени была линейной. Постройте график линеаризованной зависимости $Y(t)$. Результаты расчётов этих величин занесите в таблицу п. 3.1.

3.4 Используя построенный линеаризованный график, найдите численное значение коэффициента K . Оценивать его погрешность не требуется.

▲ **Решение. Что происходит.** Вода вытекает из бутылки только через тонкую стеклянную трубку, и её расход подчиняется закону Пуазейля $q = K\Delta P$, где ΔP — движущая разность давлений на трубке в сантиметрах водяного столба. Шланг — воздушный канал: его верхний конец внутри бутылки открыт в атмосферу (в опытах 2.1 и 2.2 пузырьки воздуха входят именно через него). Главная идея: в каждом положении трубки и шланга выяснить, чему равна ΔP и как она меняется при вытекании, а затем подставить $q = K\Delta P$ и получить $V(t)$.

Обозначения. l — длина трубки; h_1, h_2 — высоты верхних концов шланга и трубки над нижним краем пробки; z — высота уровня воды над тем же краем, z_0 — её начальное значение; V — объём вытекшей

воды; p_0 — атмосферное давление. Данных измерений в условии нет: опыт ставит сам ученик. Ниже обработка показана на условных данных (числа примера организаторов), поэтому цифры — пример, а формулы и ход решения — общие.

Часть 1. Предварительные измерения.

1.1 Линейкой измеряем трубку по всей длине: $l = 35,0$ см (пример).

1.2 Параметр b — высота столбика воды объёмом 1 мл, то есть $b = \Delta z / \Delta V$. Для мензурки измеряем линейкой расстояние между двумя метками шкалы, объёмы которых различаются на $\Delta V = 200$ мл (например, 50 и 250 мл): $\Delta z = 18,0$ см, отсюда

$$b_0 = \frac{\Delta z}{\Delta V} = \frac{18,0}{200} = 9,00 \cdot 10^{-2} \frac{\text{см}}{\text{мл}}.$$

Для бутылки доливаем в частично заполненную бутылку воду, отмеряя её мензуркой, и измеряем линейкой, на сколько поднялся уровень: на $\Delta V = 400$ мл — на $\Delta z = 12,6$ см,

$$b_1 = \frac{12,6}{400} = 3,15 \cdot 10^{-2} \frac{\text{см}}{\text{мл}}.$$

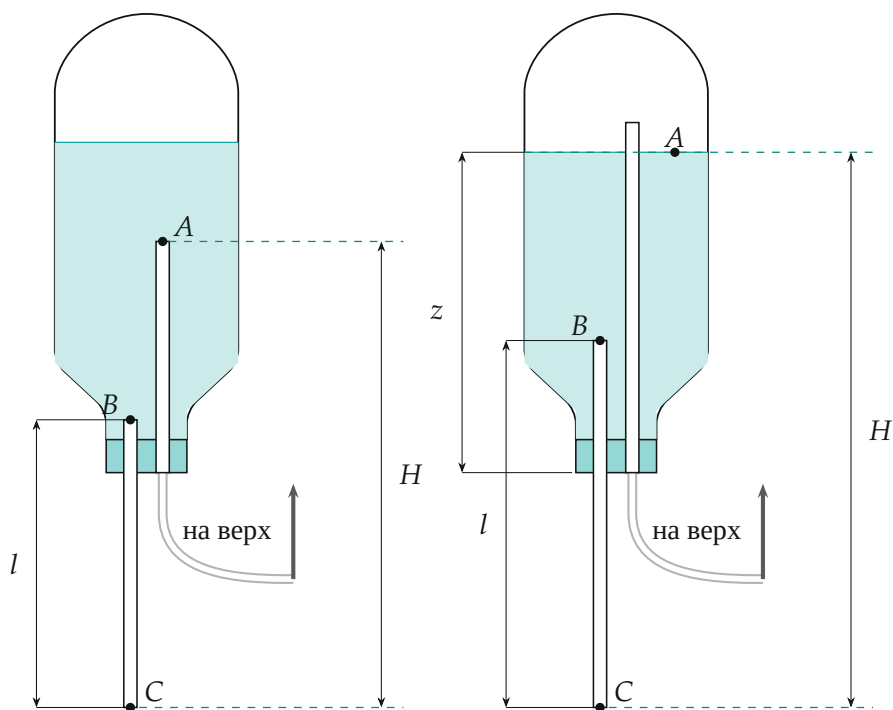
Непосредственно измерены длины и объёмы, внутренние диаметры не нужны. Измерение берём на цилиндрической части бутылки, где сечение постоянно.

Часть 2. Вытекание из бутылки.

Опыты 2.1 и 2.2: шланг и трубка под водой. В бутылке вода течёт медленно, поэтому давление в ней распределено так же, как в покоящейся воде: оно растёт вниз на 1 см вод. ст. на каждый сантиметр глубины. Воздух входит в бутылку только через верхний конец шланга, поэтому именно на его уровне давление воды равно p_0 (точка А). Конец трубки В лежит на $h_1 - h_2$ ниже точки А, поэтому там давление выше атмосферного на $h_1 - h_2$ см вод. ст. (при $h_2 > h_1$ — ниже). Выход С открыт в атмосферу, давление p_0 . На воду в трубке действует ещё и её вес: трубка вертикальна, длина воды в ней — l . Движущая разность давлений равна

$$\Delta P = (h_1 - h_2) + l = l + h_1 - h_2.$$

Это то же, что высота точки A над выходом C : в обеих точках давление атмосферное, значит, вся разность высот «работает» на трубке.



Слева — опыты 2.1 и 2.2: A — верхний конец шланга (давление p_0), B — верхний конец трубки, C — выход; $H = \Delta P$ не зависит от z . Справа — опыт 2.3: A — поверхность воды, $H = z + l - h_2$ убывает вместе с z .

Уровень z в ΔP не входит, пока верхние концы шланга и трубки под водой. Значит, расход постоянен, и вытекание идёт равномерно: $V = K(l + h_1 - h_2) t$.

Обратите внимание. Условие «концы под водой» должно выполняться до конца опыта: уровень падает на $200 b_1 = 6,3$ см, поэтому нужно $z_0 > \max(h_1, h_2) + 6,3$ см — не менее 16,3 см в опыте 2.1 и 17,3 см в опыте 2.2 (в примере организаторов $z_0 = 15,0$ см, и тогда последние миллилитры вытекают уже по закону п. 2.3, но на графике это почти не видно). Если шланг выйдет из воды раньше, ΔP начнёт убывать и прямая загнётся.

2.1.1 $z_0 > h_1 + 200$ $b_1 = 10,0 + 6,3 = 16,3$ см (в примере 15,0 см).

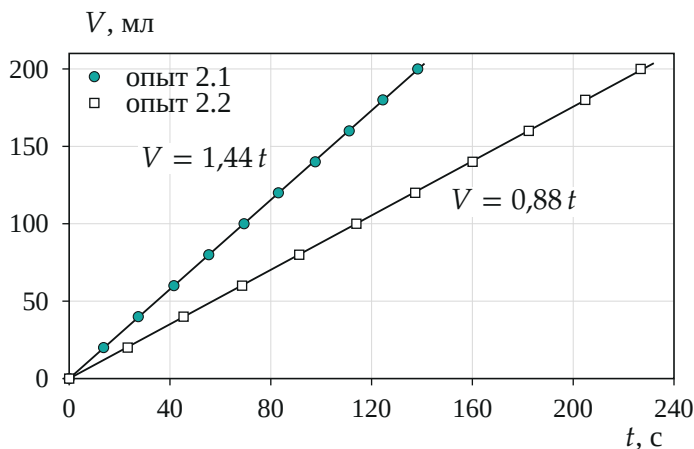
2.1.2 Данные опытов (условные) — в таблице; t — по секундомеру с памятью, показания через каждые 20 мл.

V , мл	$t_{2.1}$, с	$t_{2.2}$, с	$t_{2.3}$, с
0	0	0	0
20	13,64	23,23	13,13
40	27,41	45,38	28,47
60	41,54	68,6	43,71
80	55,37	91,28	58,75
100	69,4	113,96	74,21
120	83,02	137,32	89,75
140	97,64	160,07	105,41
160	111,13	182,37	120,68
180	124,47	204,78	136,78
200	138,31	226,76	153,44

Метод наименьших квадратов для $V = at + b$ по точкам опыта 2.1 даёт $a = (1,442 \pm 0,003)$ мл/с, $b = 0,14 \pm 0,24$ мл. Свободный член не отличается от нуля (в пределах погрешности), поэтому зависимость — пропорциональность:

$$V = at, \quad a = (1,442 \pm 0,003) \text{ мл/с}, \quad \varepsilon_a = 0,2\%.$$

Для опыта 2.2: $a = (0,880 \pm 0,002)$ мл/с, $b = -0,30 \pm 0,23$ мл — тоже нуль.



Опыты 2.1 и 2.2 на одном графике: точки лежат на прямых, проходящих через начало координат.

2.1.3 Из $q = dV/dt = K\Delta P$ при постоянной ΔP :

$$V(t) = K(l + h_1 - h_2)t.$$

2.1.4 Коэффициент наклона $a = K(l + h_1 - h_2)$, отсюда $K = a/(l + h_1 - h_2)$. Здесь $l + h_1 - h_2 = 35,0 + 10,0 - 1,0 = 44,0$ см, и

$$K = \frac{1,442}{44,0} = 3,28 \cdot 10^{-2} \frac{\text{мл}}{\text{см} \cdot \text{с}}.$$

Погрешность. Три отсчёта по линейке (l , h_1 , h_2), каждый $\pm 0,2$ см, дают для ΔP погрешность $0,2\sqrt{3} \approx 0,4$ см, то есть 0,9%. Погрешность a меньше (0,2%), поэтому

$$\varepsilon_K = \sqrt{0,9^2 + 0,2^2} \% \approx 0,9 \%, \quad K = (3,28 \pm 0,03) \cdot 10^{-2} \frac{\text{мл}}{\text{см} \cdot \text{с}}.$$

2.2.1 $z_0 > h_2 + 200 b_1 = 11,0 + 6,3 = 17,3$ см (в примере 15,0 см).

2.2.2 Результаты — второй столбец таблицы, график — на одном рисунке с опытом 2.1.

2.2.3 Теперь $h_1 < h_2$, а формула та же: давление у верхнего конца трубки ниже атмосферного на $h_2 - h_1$, но $\Delta P = l + h_1 - h_2 = 35,0 +$

$2,0 - 11,0 = 26,0$ см всё равно положительна и постоянна:

$$V(t) = K(l + h_1 - h_2)t.$$

2.2.4 $K = a/(l + h_1 - h_2) = 0,880/26,0 = 3,38 \cdot 10^{-2}$ мл/(см·с). Погрешность ΔP та же, 0,4 см, но относительная больше (1,5 %), поэтому $\varepsilon_K \approx 1,5\%$ и

$$K = (3,38 \pm 0,05) \cdot 10^{-2} \frac{\text{мл}}{\text{см} \cdot \text{с}}.$$

2.2.5 Разность $3,38 - 3,28 = 0,10$ (в единицах 10^{-2}) меньше удвоенной суммарной погрешности $2\sqrt{0,03^2 + 0,05^2} \approx 0,12$, поэтому значения можно считать равными. Дальше используем среднее

$$K = 3,33 \cdot 10^{-2} \frac{\text{мл}}{\text{см} \cdot \text{с}}.$$

Опыт 2.3: шланг над водой. Верхний конец шланга теперь в воздухе над водой, воздух над поверхностью соединён шлангом с атмосферой, давление на поверхности воды равно p_0 (точка A лежит на поверхности). Давление у верхнего конца трубки выше атмосферного на $z - h_2$, и

$$\Delta P = (z - h_2) + l = z + l - h_2.$$

Теперь ΔP зависит от z , а z убывает по мере вытекания.

2.3.1 Нужно, чтобы после вытекания 200 мл уровень остался выше трубки: $z_0 > h_2 + 200 b_1 = 5,0 + 6,3 = 11,3$ см, и шланг (его верхний конец при $h_1 = 16,0$ см) остался над водой: $z_0 < h_1$. В примере $z_0 = 14,5$ см, $h_1 = 16,0$ см, $h_2 = 5,0$ см.

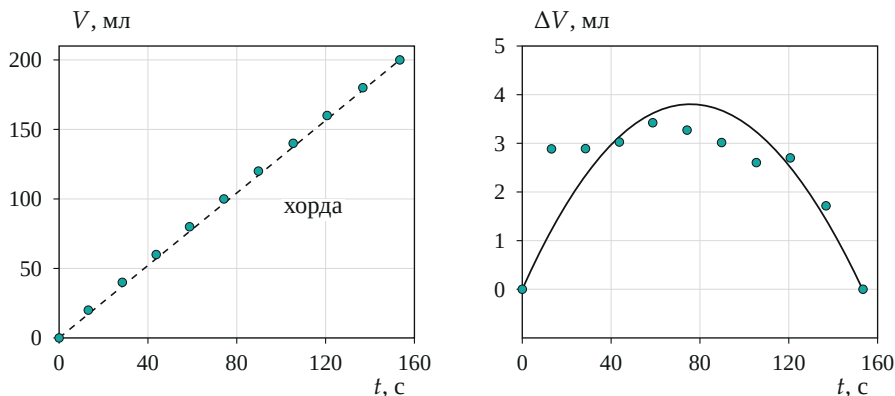
2.3.2 Результаты — третий столбец таблицы; график — слева на рисунке ниже. Из-за малой кривизны на таком графике зависимость выглядит как прямая.

2.3.3 Метод наименьших квадратов по точкам каждого участка даёт

$$a_1 = (1,34 \pm 0,02) \text{ мл/с} \quad (0\text{--}100 \text{ мл}),$$

$$a_2 = (1,27 \pm 0,01) \text{ мл/с} \quad (100\text{--}200 \text{ мл}).$$

Разность 0,07 мл/с больше суммы погрешностей, поэтому наклон убывает, и зависимость нелинейна. Это ожидаемо: расход пропорционален ΔP , а ΔP убывает.



Слева — $V(t)$ с хордой (прямая из начала координат в конечную точку). Справа — отклонение точек от хорды $\Delta V = V - \frac{200}{153,4} t$ и расчёт по формуле ниже: точки лежат выше хорды, то есть график выпуклый вверх.

2.3.4 Выразим z через V : объём воды в бутылке уменьшился на V , поэтому $z = z_0 - b_1 V$. Тогда

$$\frac{dV}{dt} = K(z + l - h_2) = K(z_0 + l - h_2 - b_1 V) = b_1 K (V_* - V),$$

где $V_* = (z_0 + l - h_2)/b_1$. Решение этого уравнения (то же, что в математической подсказке, но для величины $V_* - V$): $V = V_* (1 - e^{-b_1 K t})$. На коротком участке экспоненту можно считать прямой, наклон равен расходу при среднем уровне:

$$a = K(\bar{z} + l - h_2), \quad \bar{z} = z_0 - b_1 \langle V \rangle, \quad K = \frac{a}{\bar{z} + l - h_2}.$$

Для участка 0–100 мл $\langle V \rangle = 50$ мл, $\bar{z} = 14,5 - 3,15 \cdot 10^{-2} \cdot 50 = 12,9$ см,
 $K = \frac{1,34}{12,9 + 35,0 - 5,0} = 3,1 \cdot 10^{-2}$ мл/(см·с). Для участка 100–200 мл
 $\langle V \rangle = 150$ мл, $\bar{z} = 9,8$ см, $K = \frac{1,27}{9,8 + 30,0} = 3,2 \cdot 10^{-2}$ мл/(см·с).

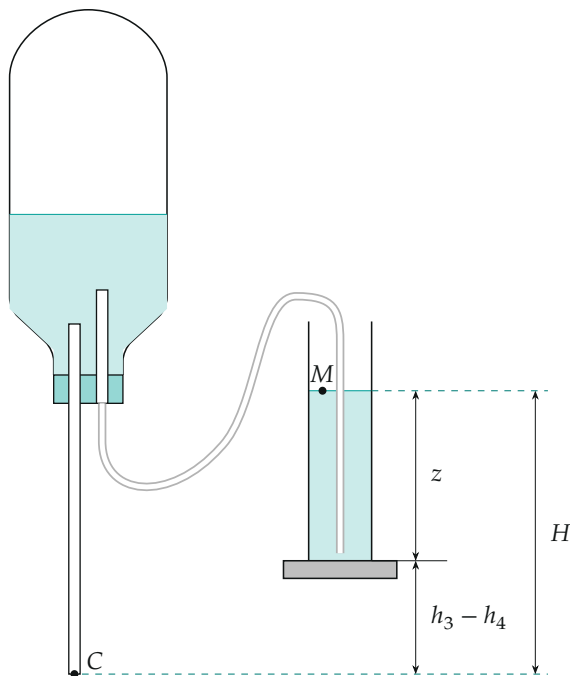
Часть 3. Всасывание.

Что происходит. Шланг теперь работает как сифон: он целиком заполнен водой и перекачивает воду из мензурки в бутылку, а из бутылки вода уходит через ту же трубку. Шланг широкий, его сопротивлением пренебрегаем, поэтому вся разность давлений приходится на трубку. Мензурка опускается по мере убыли воды, и движущая высота уменьшается.

Пусть z — высота воды в мензурке над её дном, где лежит конец шланга. Дно мензурки на h_4 , а выход трубки на h_3 ниже нижнего края пробки. Точки M (поверхность воды в мензурке) и C (выход) открыты в атмосферу, давление в них p_0 , так что движущая высота равна разности их высот:

$$H = z + h_3 - h_4.$$

Проверим на давлениях. Вода в бутылке и в шланге течёт медленно, поэтому давление в ней распределено как в покоящейся воде, и давление в верхней точке трубки B (высота h_2) равно $p_0 + (z - h_4 - h_2)$, потому что поверхность M на $z - h_4$ выше нижнего края пробки. С учётом веса воды в трубке ($l = h_2 + h_3$) разность давлений на трубке $z - h_4 - h_2 + h_2 + h_3 = z + h_3 - h_4$.



Давление равно p_0 на поверхности воды в мензурке M и на выходе трубки C ; движущая высота $H = z + (h_3 - h_4)$.

3.2 Уровень в мензурке пропорционален объёму: $z = b_0 V$. Объём в мензурке убывает с расходом $q = KH$:

$$\frac{dV}{dt} = -K(b_0 V + h_3 - h_4) = -b_0 K (V + V_*), \quad V_* = \frac{h_3 - h_4}{b_0}.$$

Численно $V_* = 8,5 / (9,00 \cdot 10^{-2}) = 94,4$ мл. Для величины $X = V + V_*$ получили $dX/dt = -b_0 K X$ — уравнение (1) из подсказки, поэтому

$$V(t) + V_* = (V_0 + V_*) e^{-b_0 K t}.$$

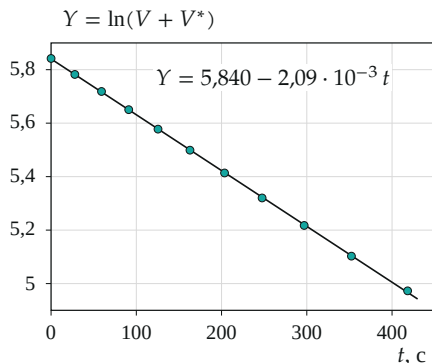
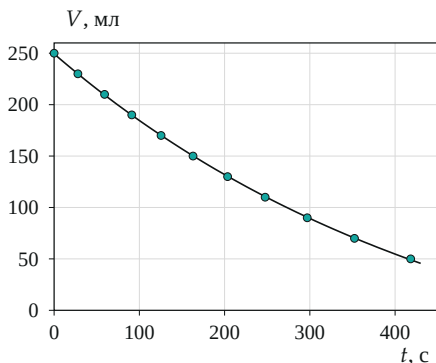
Объём V_* соответствует высоте $h_3 - h_4$ в мензурке ($b_0 V_* = h_3 - h_4$): даже в пустой мензурке остаётся движущая высота $h_3 - h_4$, и вода течёт, пока не кончится.

Обратите внимание. Объём погружённой части шланга учитывать не нужно: шкала мензурки определяет уровень, а b_0 получено по той же

шкале. Погружённый шланг уменьшает объём воды на единицу высоты лишь на несколько процентов, это меньше погрешностей опыта.

3.1 Условные данные: $h_1 = 5,0$ см, $h_2 = 3,0$ см, $h_3 = 32,0$ см, $h_4 = 23,5$ см ($h_3 - h_4 = 8,5$ см). Мензурка заполнена до $V_0 = 250$ мл, показания времени — через каждые 20 мл. Столбец Y рассчитан по п. 3.3.

V , мл	t , с	$Y = \ln(V + V^*)$
250	0,00	5,842
230	27,90	5,782
210	59,16	5,718
190	91,06	5,651
170	125,44	5,578
150	162,98	5,499
130	203,49	5,414
110	247,59	5,320
90	296,95	5,217
70	352,39	5,103
50	418,27	4,973



3.3 Линеаризующая функция следует из п. 3.2:

$$\ln(V + V_*) = \ln(V_0 + V_*) - b_0 K t, \quad Y = \ln(V + V_*).$$

Значения Y внесены в таблицу. Графики — на рисунке: слева $V(t)$ (линия — формула п. 3.2 с найденным ниже K), справа линеаризованный

$Y(t)$ — прямая.

3.4 Метод наименьших квадратов даёт $Y = 5,840 + at$, $a = -(2,09 \pm 0,01) \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. Наклон равен $-b_0K$, поэтому

$$K = -\frac{a}{b_0} = \frac{2,09 \cdot 10^{-3}}{9,00 \cdot 10^{-2}} = 2,32 \cdot 10^{-2} \frac{\text{мл}}{\text{см} \cdot \text{с}}.$$

Постоянная времени $1/(b_0K) \approx 480 \text{ с}$.

Проверка. Размерность: $[K] = \frac{\text{мл/с}}{\text{см}}$, у b_0K — $\frac{\text{см}}{\text{мл}} \cdot \frac{\text{мл}}{\text{см} \cdot \text{с}} = \text{с}^{-1}$, как у показателя экспоненты. Предельные случаи: при $b_1 \rightarrow 0$ (бутылка очень широкая) формулы п. 2.3 переходят в линейную $V = K(z_0 + l - h_2)t$, как в п. 2.1; у п. 3.2 при $h_3 = h_4$ получаем $V_* = 0$ и чистую экспоненту. Второй способ: три независимых опыта части 2 дают $K = 3,28, 3,38$ и $3,15 \cdot 10^{-2}$ (среднее по участкам п. 2.3) — одно число с разбросом около 5%. Значение $2,32 \cdot 10^{-2}$ из части 3 заметно меньше: в этой схеме на пути воды стоит ещё и сам водяной шланг, и он вносит дополнительное сопротивление (при последовательном соединении складываются обратные коэффициенты: $1/K_{\text{эфф}} = 1/K + 1/K_{\text{ш}}$, откуда по данным примера $K_{\text{ш}} \approx 7,6 \cdot 10^{-2}$). Это оценка, а не измерение.

Вся физика опыта — правильно найти движущую разность давлений: для этого достаточно двух точек, где давление равно атмосферному.

Ответ. 1.1) $l = 35,0 \text{ см}$; 1.2) $b_0 = 9,00 \cdot 10^{-2} \text{ см/мл}$, $b_1 = 3,15 \cdot 10^{-2} \text{ см/мл}$; 2.1.1) $z_0 > 16,3 \text{ см}$; 2.1.2) $V = at$, $a = (1,442 \pm 0,003) \text{ мл/с}$; 2.1.3) $V = K(l + h_1 - h_2)t$; 2.1.4) $K = (3,28 \pm 0,03) \cdot 10^{-2} \text{ мл/(см} \cdot \text{с)}$; 2.2.1) $z_0 > 17,3 \text{ см}$; 2.2.4) $K = (3,38 \pm 0,05) \cdot 10^{-2} \text{ мл/(см} \cdot \text{с)}$; 2.2.5) можно считать равными, $K = 3,33 \cdot 10^{-2}$; 2.3.3) $a_1 = 1,34 \pm 0,02$ и $a_2 = 1,27 \pm 0,01 \text{ мл/с}$, зависимость нелинейна; 2.3.4) $K = 3,1 \cdot 10^{-2}$ и $3,2 \cdot 10^{-2} \text{ мл/(см} \cdot \text{с)}$; 3.2) $V + V_* = (V_0 + V_*)e^{-b_0Kt}$, $V_* = (h_3 - h_4)/b_0$; 3.3) $Y = \ln(V + V_*)$; 3.4) $K = -a/b_0$ с $a = -2,09 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$, $K = 2,32 \cdot 10^{-2} \text{ мл/(см} \cdot \text{с)}$.