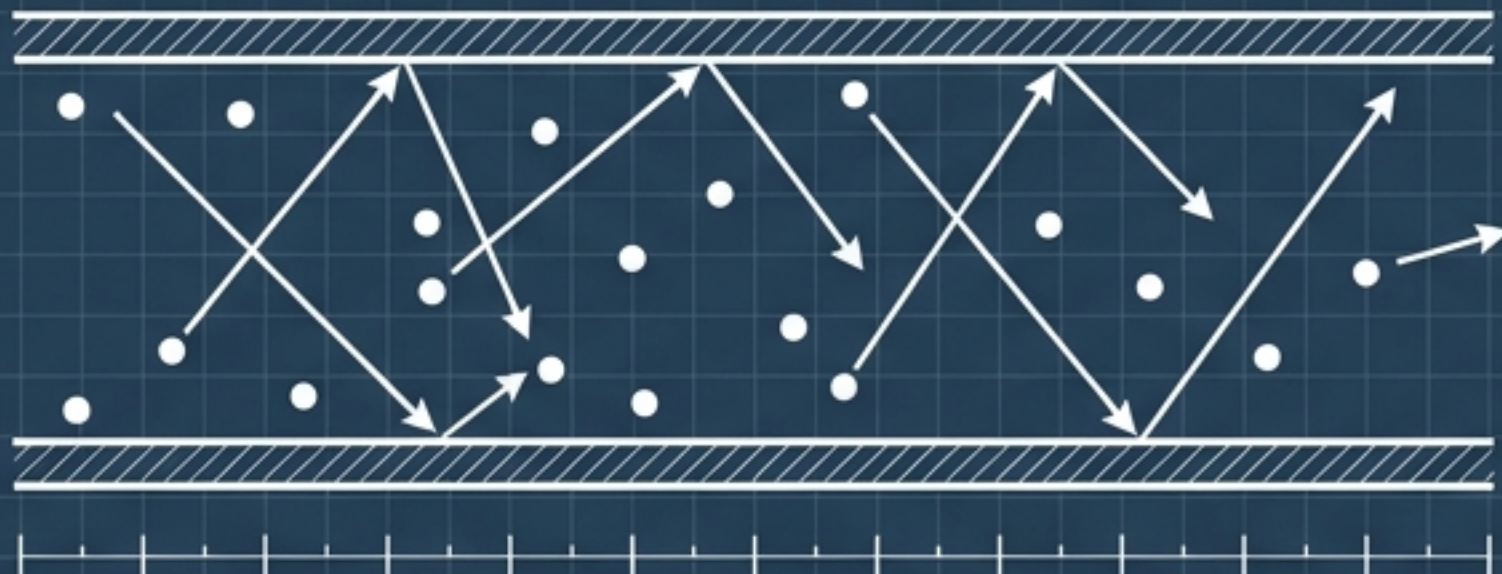


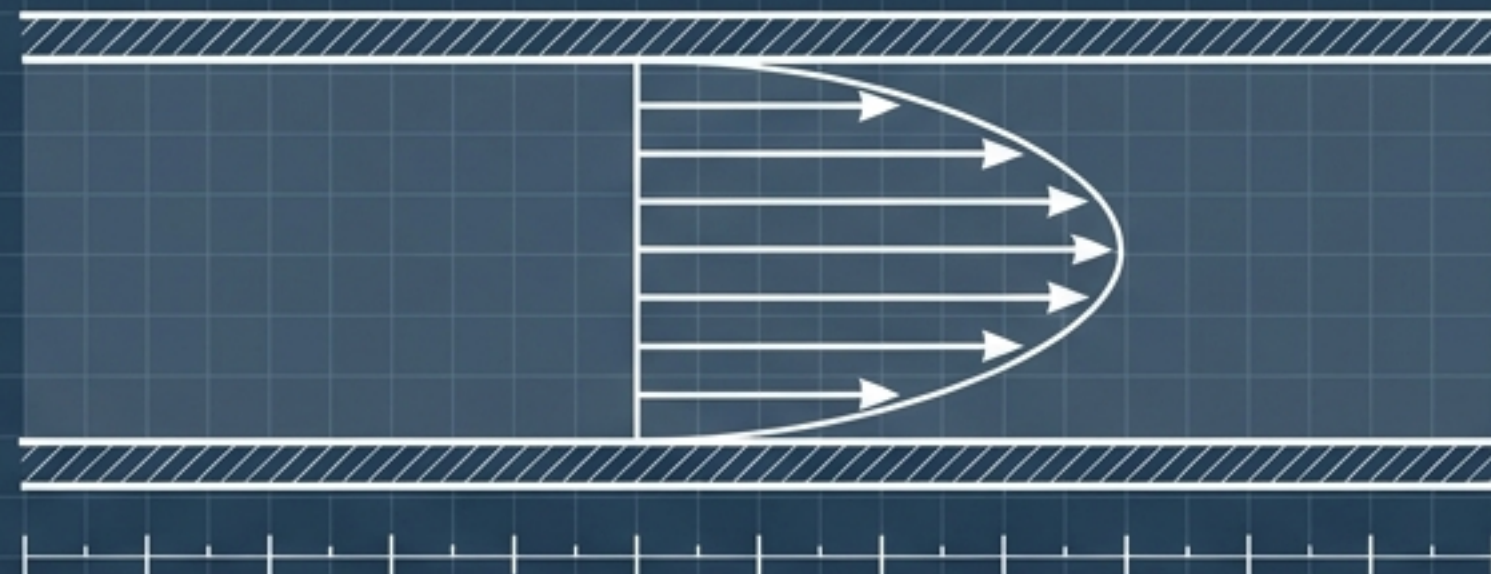
ТЕМА: Режимы течения газа и базовая физика

ЗНАЧИМОСТЬ: Понимание режима течения критично для пересчета натекания с гелия на другие газы.

Молекулярный режим



Вязкий режим



ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ФОРМУЛА

Потоки $< 10^{-12}$ mol/s относятся к молекулярному режиму. Поток зависит от массы как $M^{-1/2}$.

Формула зависимости молярного потока Q_m :

$$Q_m \propto \left(\frac{1}{MRT} \right)^{1/2} \left(\frac{d^3}{L} \right) (P_1 - P_2)$$

M – молекулярная масса, R – газовая постоянная, T – абсолютная температура, d – диаметр, L – длина, P_1 , P_2 – давления.

ИНЖЕНЕРНЫЕ ВЫВОДЫ

Переходный режим (от 10^{-12} до 10^{-6} mol/s) не имеет точных аналитических формул. Использование «эквивалента утечки воздуха» на основе калибровки по гелию в переходном режиме **некорректно и недействительно**.

В источнике не указано:
Аналитические формулы для точного расчета переходного режима.

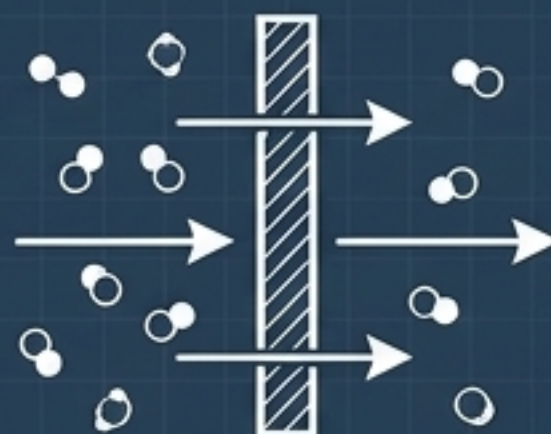
ТЕМА: Классификация и характеристики эталонных течей

ЗНАЧИМОСТЬ: Выбор типа течи определяет температурные погрешности и рабочий диапазон давлений.



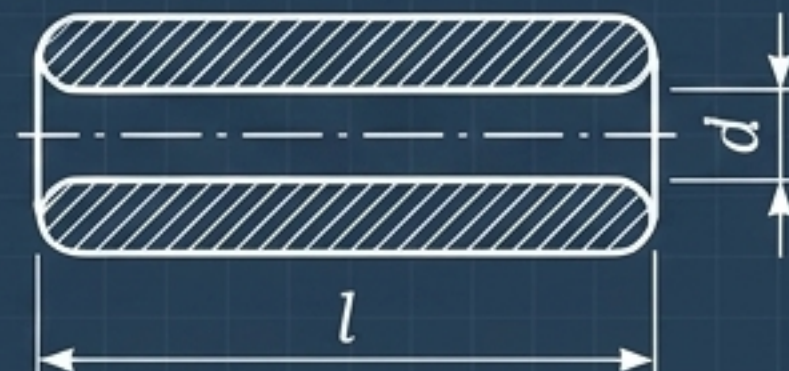
КАПИЛЛЯРНЫЕ

- Работа с чистыми газами и смесями. Температурный коэффициент менее $0.5\% \text{ K}^{-1}$.
- Требуют эмпирического определения зависимости от давления.
- В источнике не указано: Внутренние формы и размеры капилляров неизвестны, теоретический расчет коррекций невозможен.



ПРОНИЦАЕМЫЕ (ДИФфуЗИОННЫЕ)

- Диапазон: от 10^{-9} до 10^{-7} mbar L/s.
 - Критично чувствительны к температуре (экспоненциальная зависимость).
- ВНИМАНИЕ:** Линейная температурная коррекция вместо экспоненциальной дает ошибку до 45% (при калибровке на 38°C и использовании на 25°C).



НАНОКАНАЛЬНЫЕ

- Молекулярный режим сохраняется до атмосферного давления за счет малого диаметра.
- Пример геометрии:
диаметр $d = 7 \times 10^{-8} \text{ м}$,
глубина $l = 7 \times 10^{-5} \text{ м}$.

ТЕМА: Расчет калиброванной течи на базе наноструктур (Уравнение Кнудсена)

ЗНАЧИМОСТЬ: Задание геометрических параметров для аналитического получения требуемого потока.

Проводимость одиночной структуры:

$$Y = 12.1 \times \sqrt{\frac{29}{M}} \times \sqrt{\frac{T}{293}} \times \frac{D^3}{L}$$

Условие применимости: $L \geq 20D$

Общий поток:

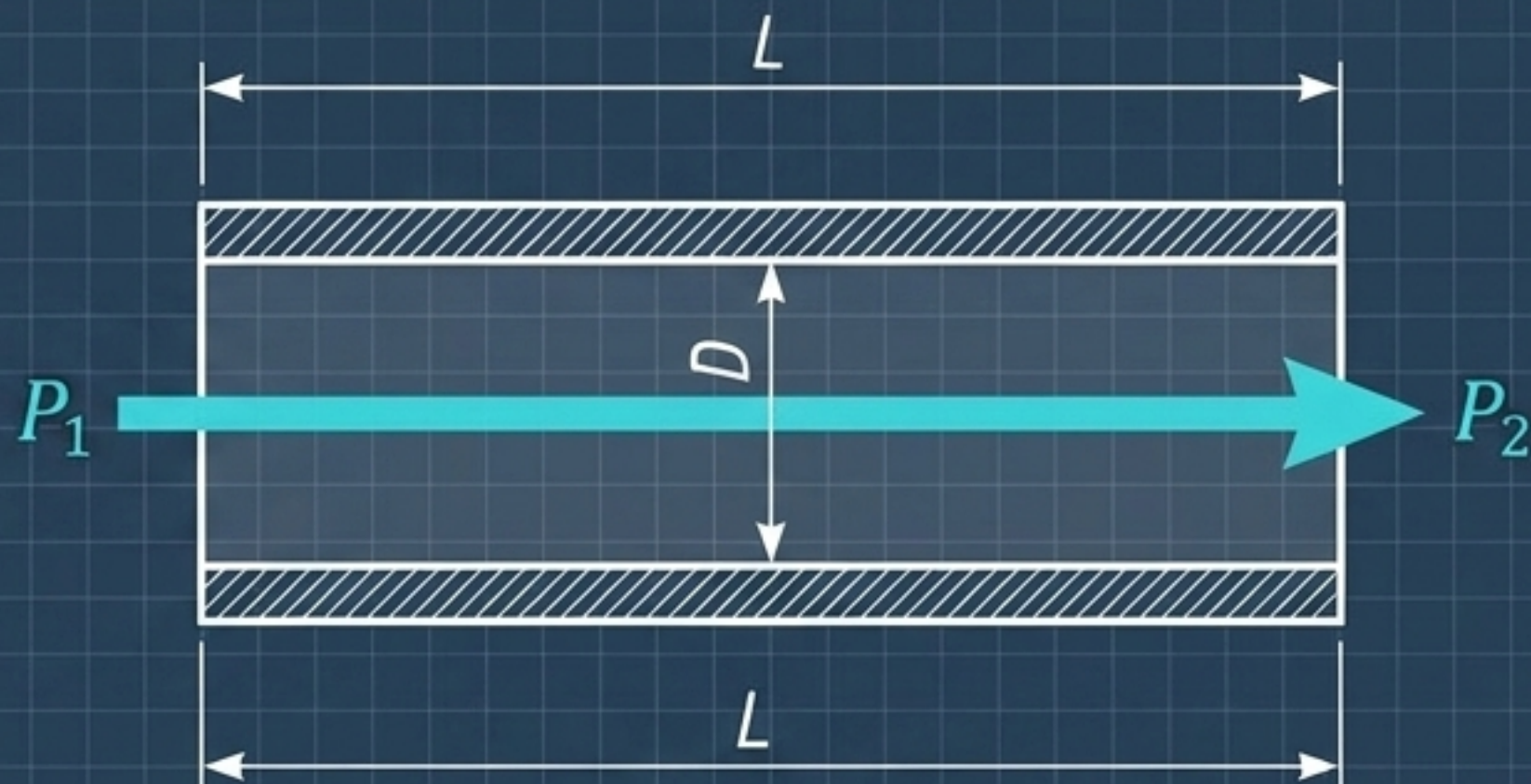
$$Q = n \times (P_1 - P_2) \times Y$$

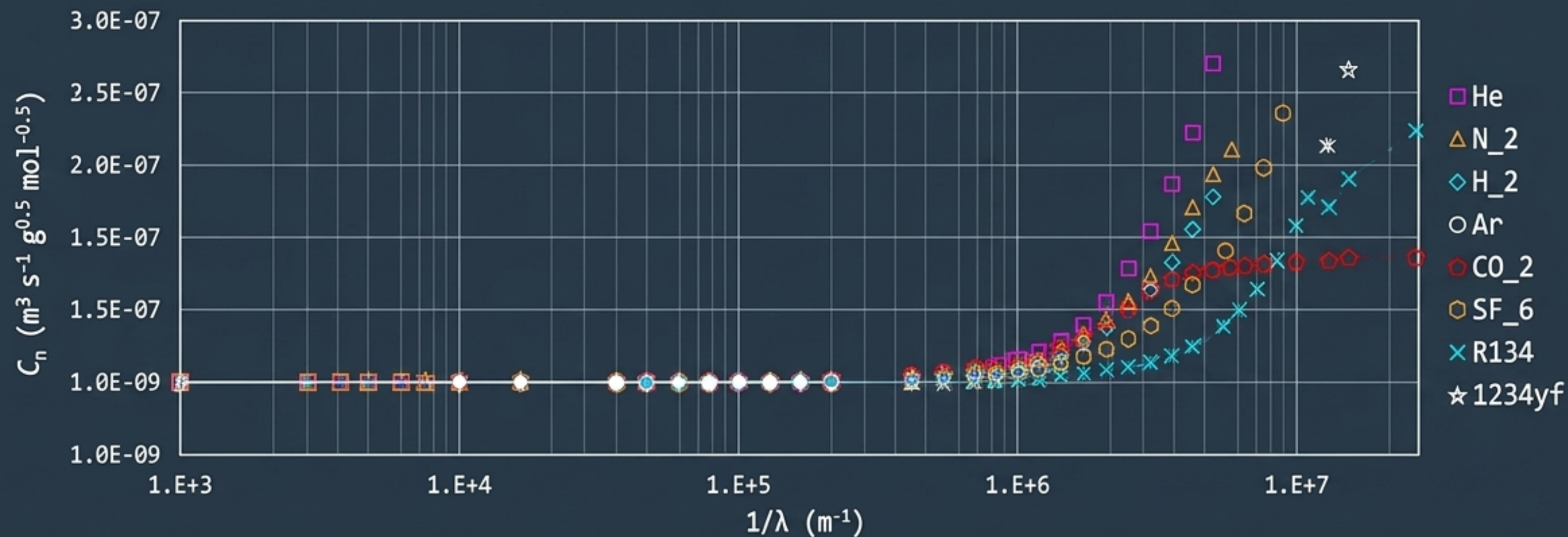
ПЕРЕМЕННЫЕ И ВЫВОДЫ

Y – проводимость (L/s), M – мол. масса, T – абс. температура (K), D – диаметр (см), L – длина (см), Q – поток (Torr·L/s), n – количество структур, P_1 , P_2 – давления (Torr).

Вывод: Конструкция позволяет рассчитывать проводимость для различных газов исключительно по их массе.

В источнике не указано: Отклонения формулы для сверхвысоких давлений.





ТЕМА: Нормализованная проводимость (C_n) от обратной длины свободного пробега ($1/\lambda$)

Формула: $C_n = C \sqrt{M_g}$, где M_g – молярная масса газа.

Описание: Кривые для различных газов полностью совпадают в левой части графика. Резкий подъем справа – переход в вязкий режим.

ИНЖЕНЕРНЫЕ ВЫВОДЫ

- Молекулярный режим сохраняется при давлениях до 100 кПа (гелий) и 60 кПа (азот, кислород, аргон). Это позволяет точно предсказывать поток других газов на основе калибровки по гелию.
- В источнике не указано: Поведение для газов, не представленных на графике.

ТЕМА: Первичный эталон – Расходомер
постоянного давления (CRFM)

ЗНАЧИМОСТЬ: Эталонная неопределенность 0.019%.

Объем изменяется за счет точного движения поршня в масляной камере, сжимающего сильфон. Перемещение измеряется лазерным интерферометром.

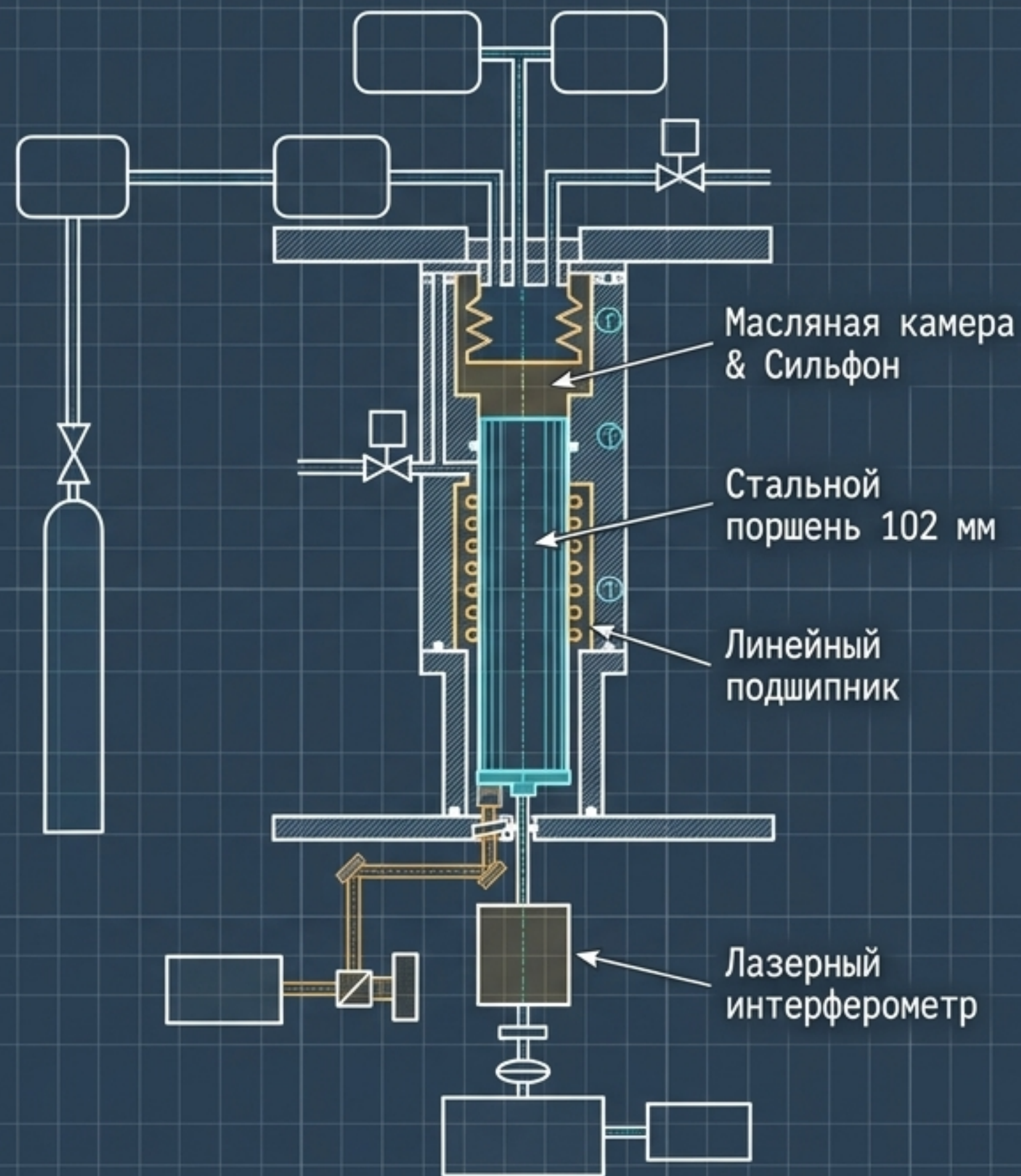
Расчет изменения количества молей (Δn):

$$\Delta n = \frac{P\pi D^2/4}{RT(1 + BP)} \Delta x$$

P – давление, D – диаметр поршня, Δx – перемещение, R – газовая постоянная, T – температура, B – второй вириальный коэффициент.

ВЫВОДЫ: Постоянное давление исключает адиабатический нагрев. Масло (Octoil S) должно быть строго дегазировано.

В источнике не указано: Точная методика дегазации масла сверх работы диффузионного насоса.





ТЕМА: Гравиметрический метод калибровки

ЗНАЧИМОСТЬ: Независимый статический метод с погрешностью **0.019%**.

ФИЗИКА ИЗМЕРЕНИЙ:

Измерение потери массы газового баллона сравнивается с интегрированным расходом через LFM.

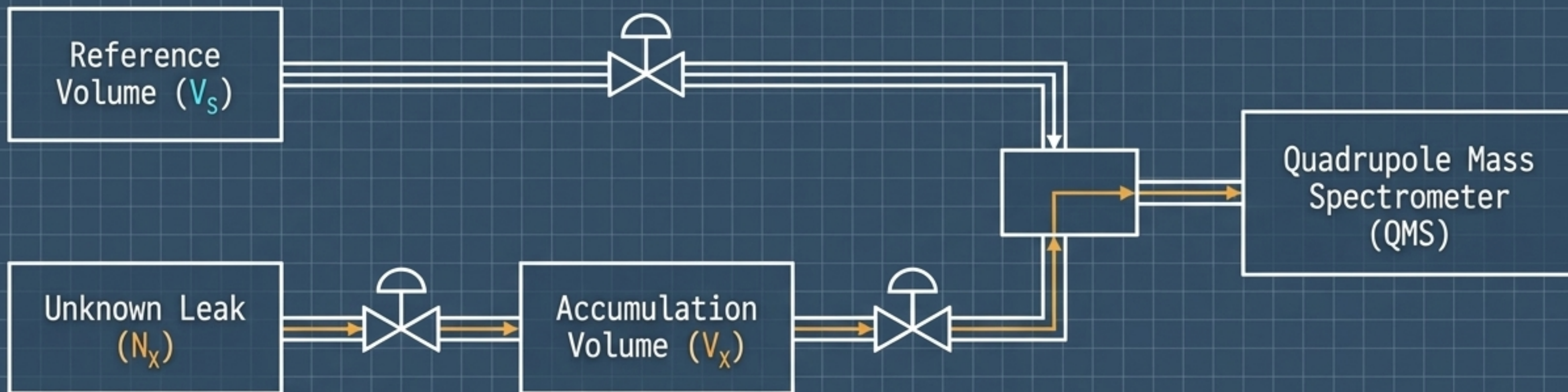
При взвешивании необходимо строго учитывать силу Архимеда (buoyancy). Падение давления (на **10 МПа**) вызывает изменение внешнего объема баллона на **21 см³**.

ИНЖЕНЕРНЫЕ ВЫВОДЫ:

- Обязательна коррекция на вытесненный воздух из-за деформации баллона.
- Для **N₂** поправка составляет **-0.009%**.
- Для **He** поправка составила бы **0.063%**.
- В источнике не указано: Конкретная модель применяемого масс-компаратора.

ТЕМА: Метод калибровки Accumulate-Dump (Накопление и сброс)

ЗНАЧИМОСТЬ: Применяется для диапазонов малых потоков от 10^{-10} до 10^{-5} Pa m³/s.



ПРОЦЕДУРА:

Известное количество газа $Q_s = p_s \times V_s$ сравнивается с газом от неизвестной течи, накопленным за время Δt в объеме V_x .

Накопление: от 3 минут до 1 часа.

Начальное давление эталона измеряется мембранным датчиком (MKS Baratron 627B на 1 Torr).

ИНЖЕНЕРНЫЕ ВЫВОДЫ И ОГРАНИЧЕНИЯ:

QMS менее стабилен, чем ионизационные датчики. Сдвиги чувствительности в несколько процентов являются типичными и выступают основным источником случайной ошибки.

В источнике не указано:

Формула прямого пересчета сигнала QMS в поток.

ТЕМА: Инженерный анализ погрешностей и неопределенностей

СРФМ ДИАМЕТР

Ошибка определения площади поршня:
 $\delta DT = 0.6 \text{ } \mu\text{m}$

Неопределенность: **0.003%**

СРФМ ТЕМПЕРАТУРА И ДАВЛЕНИЕ

Разница (газ/датчик): $\delta T_{\text{gas}} = 0.01 \text{ K} \rightarrow$
Неопределенность: **0.011%**

Ошибка кварцевого датчика: $7 \text{ Pa} \rightarrow$
Неопределенность: **0.015%** (при 100 kPa)

ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ: ВТОРИЧНАЯ КАЛИБРОВКА

Комбинированная расширенная неопределенность при использовании коммерческого масс-спектрометра (MSLD) может достигать **16%** (фактор охвата **k = 2**).

ДРЕЙФ И ПРИМЕСИ

- Газовые примеси незначительны: **1% SF₆** в **N₂** дает ошибку всего **0.01%**.
- Долговременный дрейф течей из спеченного металла достигает **10%** (стабильность улучшается с ростом потока).
- В источнике не указано: Механизмы предотвращения дрейфа металлокерамики.

ТЕМА: Патент RU 2402003 C1 – Устройство диффузионной течи для пузырькового метода

ЗНАЧИМОСТЬ: Применение высокостабильной

ЗНАЧИМОСТЬ: Применение высокостабильной диффузионной течи для индикации жидкостями под водой без риска разрушения мембраны.

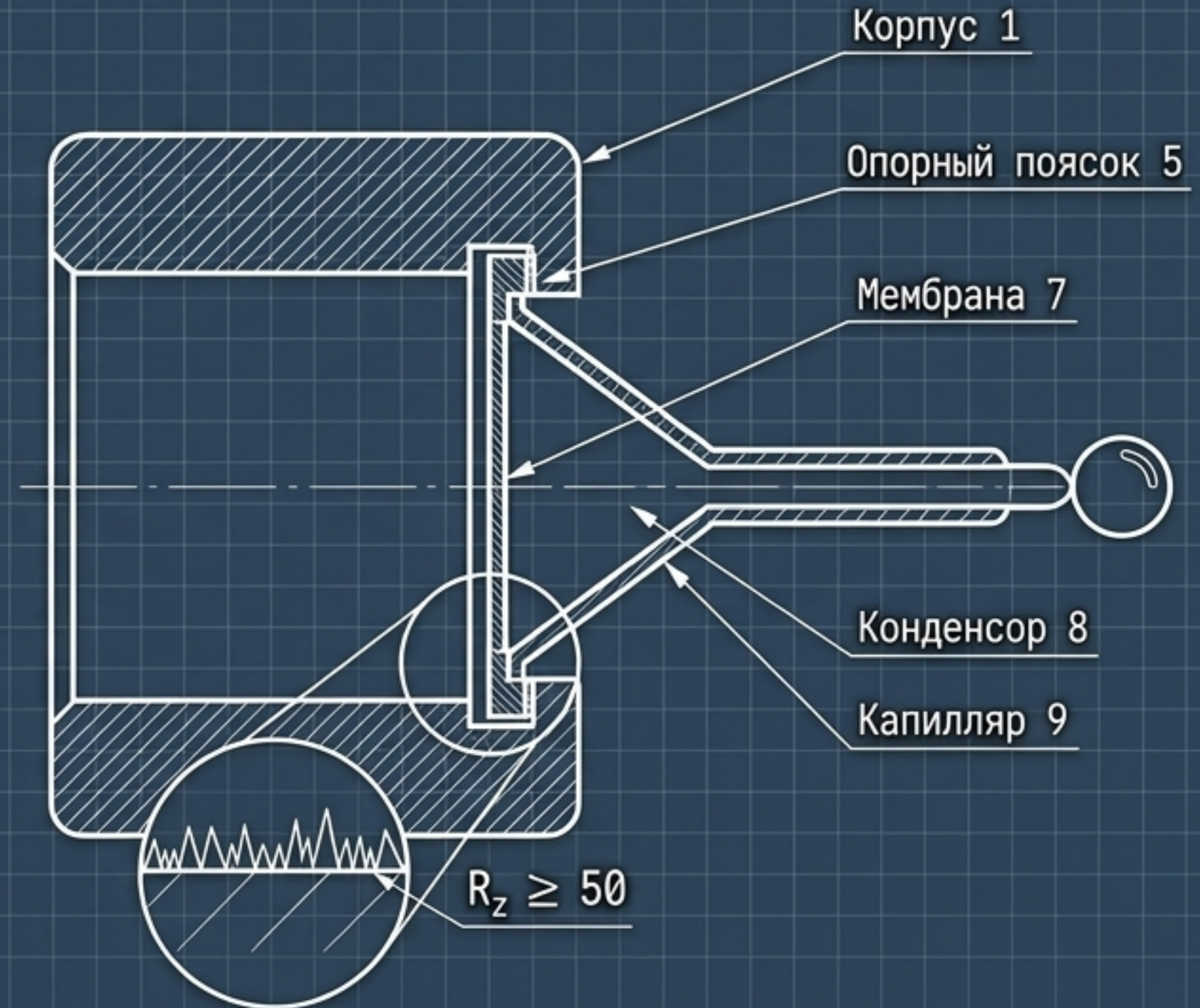
ФИЗИЧЕСКИЙ ПРИНЦИП:

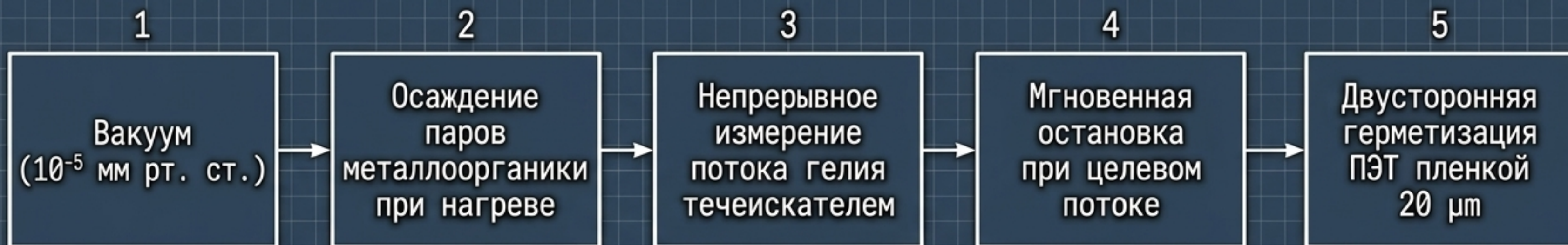
- Конденсор собирает газ в одну точку у входа в капилляр. Длина капилляра строго больше высоты капиллярного поднятия применяемой жидкости.
- Контактная поверхность конденсора имеет шероховатость $R_z \geq 50$. Капилляр покрыт гидрофобным материалом.

ВЫВОДЫ:

Исключается попадание воды на полимерную ПЭТ-мембрану. Гарантирован высокостабильный поток для визуального замера пузырька. Дренажное отверстие выпускает атмосферный воздух перед стартом.

В источнике не указано:
Конкретные геометрические размеры капилляра.





ТЕМА:

Патент SU 974176 A2 — Изготовление проницаемого элемента контрольной течи

ЗНАЧИМОСТЬ:

Радикальное повышение долговременной стабильности за счет предотвращения внутренней коррозии и засорения.

ИНЖЕНЕРНЫЕ ВЫВОДЫ И ОБОСНОВАНИЕ:

- Полимерная пленка проницаема для индикаторного газа (**гелия**), но герметично изолирует напыленный **микроканал** от внешней среды. Это устраняет риск засорения микропылью и блокирует деградацию канала от воздействия атмосферы, кардинально уменьшая частоту **рекалибровок** устройства.
- **В источнике не указано:** Точный химический состав металлоорганического соединения для осаждения.

ИТОГОВЫЕ ИНЖЕНЕРНЫЕ ВЫВОДЫ (ДЛЯ ЛАБОРАТОРИИ ЛИКЛАБ)



Пересчет эквивалента утечки воздуха по гелию абсолютно недопустим для переходного режима течения газа.



Наноканальные структуры позволяют применять уравнение Кнудсена и законы молекулярного течения при давлениях вплоть до атмосферного.



Температурные поправки для диффузионных течей строго экспоненциальные; линейные поправки дают критические ошибки **до 45%**.



Первичные методы (CRFM, гравиметрия) достигают точности **0.019%**, в то время как вторичная калибровка масс-спектрометров дает неопределенность **до 16%**.



Использование гидрофобных капилляров и микрошероховатых конденсоров (патент РФ) позволяет калибровать течи дешевым пузырьковым методом под водой.

(Окончание модуля. Дополнительные данные в источнике не указаны).