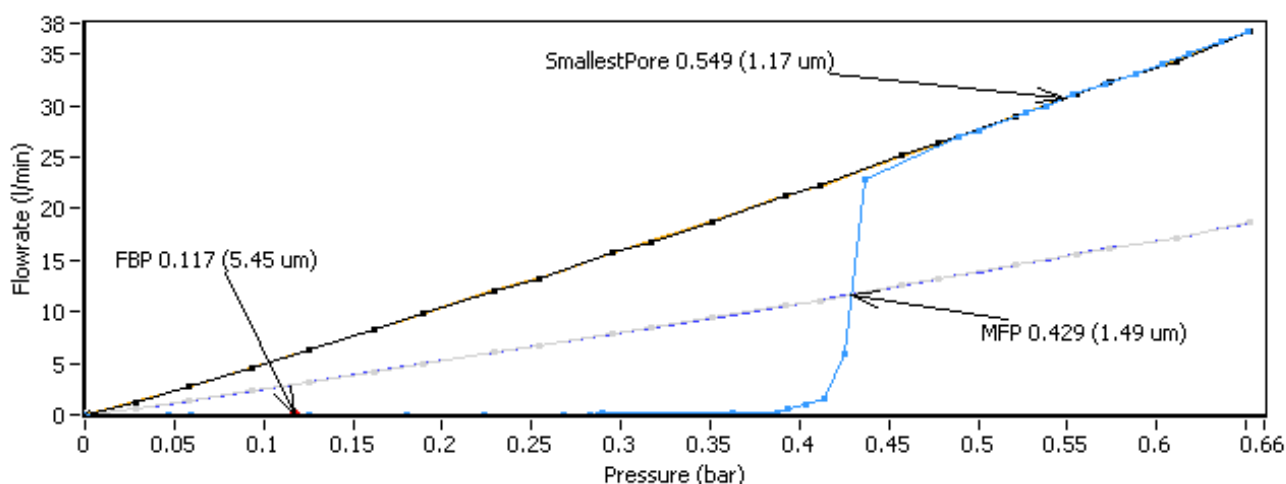


## Расчеты, применяемые в порометрии

**POROLUX™ 1000** – это прибор, принцип работы которого имеет строгое научное обоснование. Для лучшего понимания возможностей прибора, а также ограничений связанных с используемой физической моделью, мы приводим основные математические и физические выкладки, на которых базируется данное устройство.

Порометр измеряет поток газа, как функцию от давления. Обычные кривые, получаемые при измерении смоченного и сухого образца, представлены на рисунке 1. Кривые, полученные в результате измерений смоченного образца, необходимы для определения размера пор. Испытания сухого образца, позволяют рассчитать средние размеры пор, наименьшую пору, и газовую проницаемость.



**Рисунок 1: Типичный пример порометрических измерений, выполненных на фильтре**

Как описано в наших статьях, посвященных определению точки пузырька, существует несколько путей для определения этого важного параметра. Средний гидравлический размер пор (**MFP**) рассчитывается из пересечения мокрой кривой (голубая линия на **рисунке 1**) и так называемой «полусухой» кривой. Эта «полусухая» кривая (серая линия на **рисунке 1**), является половиной от сухой кривой. Обычно это значение соответствует наиболее распространенному размеру пор в материале. **Наименьшая пора** рассчитывается исходя из давления, при котором сухая кривая совмещается с мокрой (см. **рисунк 1**).

Для пересчета этих давлений на размер поры, используется уравнение Уошборна. Это уравнение выражает математическую связь между давлением и диаметром пор с учетом поверхностного натяжения и угла контакта смачивающей жидкости:

$$D = 0.04 \times \gamma \times \cos\theta / P$$

Где

$D$  – поверхностное натяжение в микронах

$\gamma$  – поверхностное натяжение в дин/см

$\theta$  – угол контакта между смачивающей жидкостью и субстратом

$P$  – давление в бар

Если смачивающая жидкость полностью смачивает материал, то никакого угла контакта наблюдаться не должно (**Рисунок 2**). Хорошая смачивающая жидкость полностью исчезает в порах. Выбор смачивающей жидкости с углом контакта близким к нулю, имеет большое значение для правильного выполнения измерений, а также упрощает уравнение, поскольку  $\cos 0 = 1$ . В этом случае уравнение Уошборна примет вид:

$$D = 0.04 \gamma / P$$

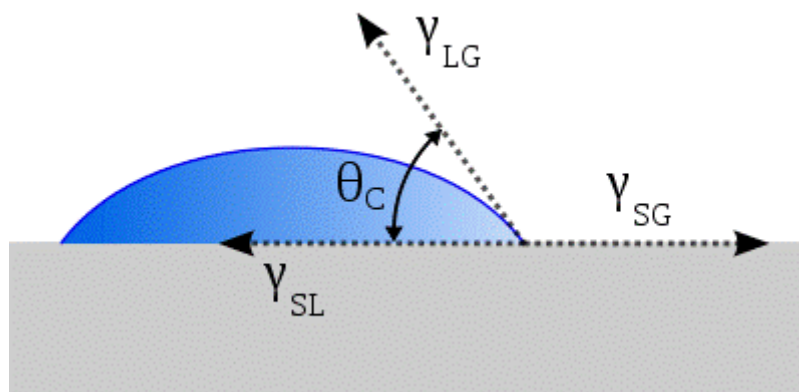


Рисунок 2: Определение угла контакта (источник Википедия)

Поверхностное натяжение обычно сводится к поверхностному натяжению между жидкостью и воздухом или любым другим инертным газом. Для воды это значение будет около 72 дин/см, для хорошо известных жидкостей из группы перфторэфиров, это значение около 16 дин/см. В уравнение Уошборна все поры считаются цилиндрическими и прямыми. В связи с этим, форма и кривизна пор, также могут влиять на результаты измерений. Поэтому, иногда используют линейные корректирующие факторы, такие как фактор формы и фактор кривизны.

Одним из ключевых преимуществ порометров использующих процедуру стабилизации давления и потока, является то, что в них заложена **возможность компенсации влияния формы и кривизны**: если давление остается стабильным достаточно долго, то, в конце концов, все поры с одинаковым диаметром (но разной длины) будут открыты. Более того, изменяя алгоритмы стабилизации, Вы можете получить представление о структуре пор в материале (см. также статью о влиянии фактора формы). Порометр без алгоритмов стабилизации (порометр сканирующего давления) не имеет такой возможности. Поэтому в нем фактор формы и кривизны желательно учитывать.

Кроме значений первой точки пузырька, среднего гидравлического размера пор и наименьшей поры, можно получить информацию о распределении пор по размерам (по аналогии с порозиметрией и размером частиц). Эти расчеты описаны в стандарте ASTM F 316-03. Исходя из мокрой и сухой кривых, получают три кривые, которые являются производными от измеренных значений. Дифференциальная кривая, или **DIF**, показывает процент пор, найденных при определенном давлении. Интегральная кривая **CUM** – является суммой всех дифференциальных значений от 0 до 100%.

Однако, поскольку давление обратно пропорционально диаметру ( $P \sim 1/D$ ), то один и тот же шаг (разница между соседними точками) в области высоких и низких давлений, в пересчете на размер пор, будет не эквивалентен для пор, измеренных при низком и высоком давлении! Например, возьмем давление от 0.1 бар с шагом 0.05. В пересчете на размер пор (при  $\gamma = 16$  Дин/см), мы получим диаметр  $D = 6.4$  мкм (0.1 бар) и 4.3 мкм (0.15 бар). При 2 бар, увеличив давление на тот же самый шаг 0.05 бар, мы получим диаметры 0.32 мкм (2 бар) и 0.31 мкм (2.05 бар). Для учета этих различий, DIF кривая пересчитывается, путем деления каждого значения на разность между соседними порами. Такую кривую называют корректирующей дифференциальной кривой или **CDIF**. Именно эта кривая обычно предлагается в качестве кривой распределения пор по размерам. Поскольку прибор измеряет только точки, мы не используем гистограммы для построения графиков распределения пор по размеру.

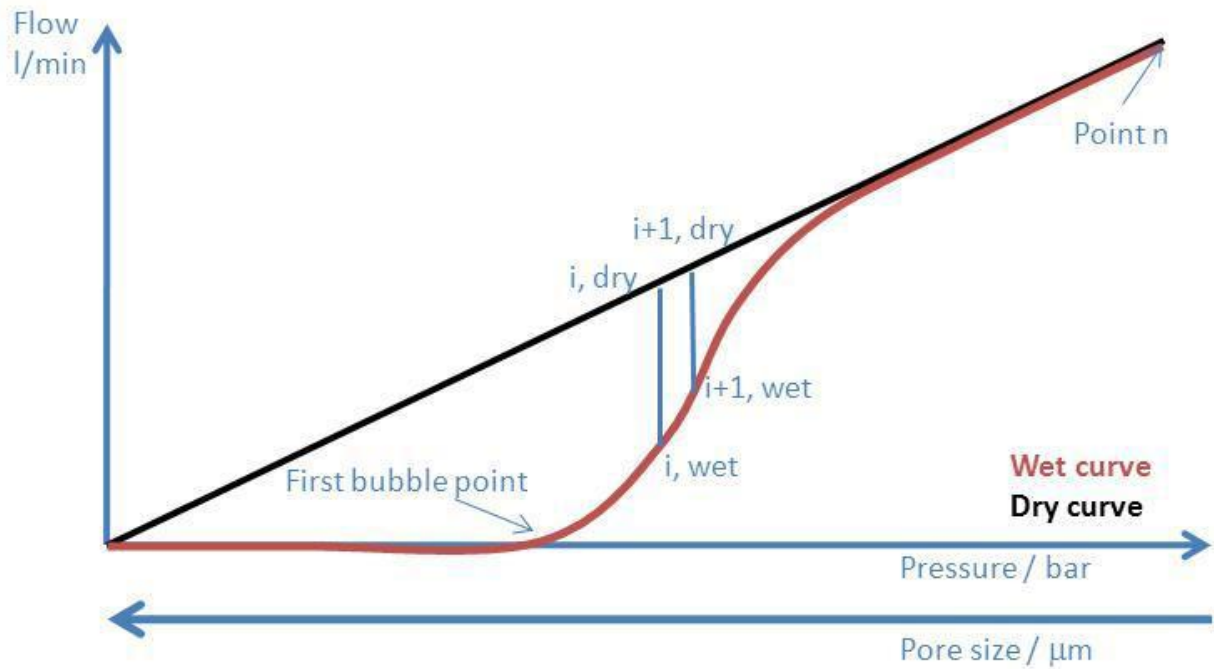


Рисунок 3: Теоретические мокрая и сухая кривые

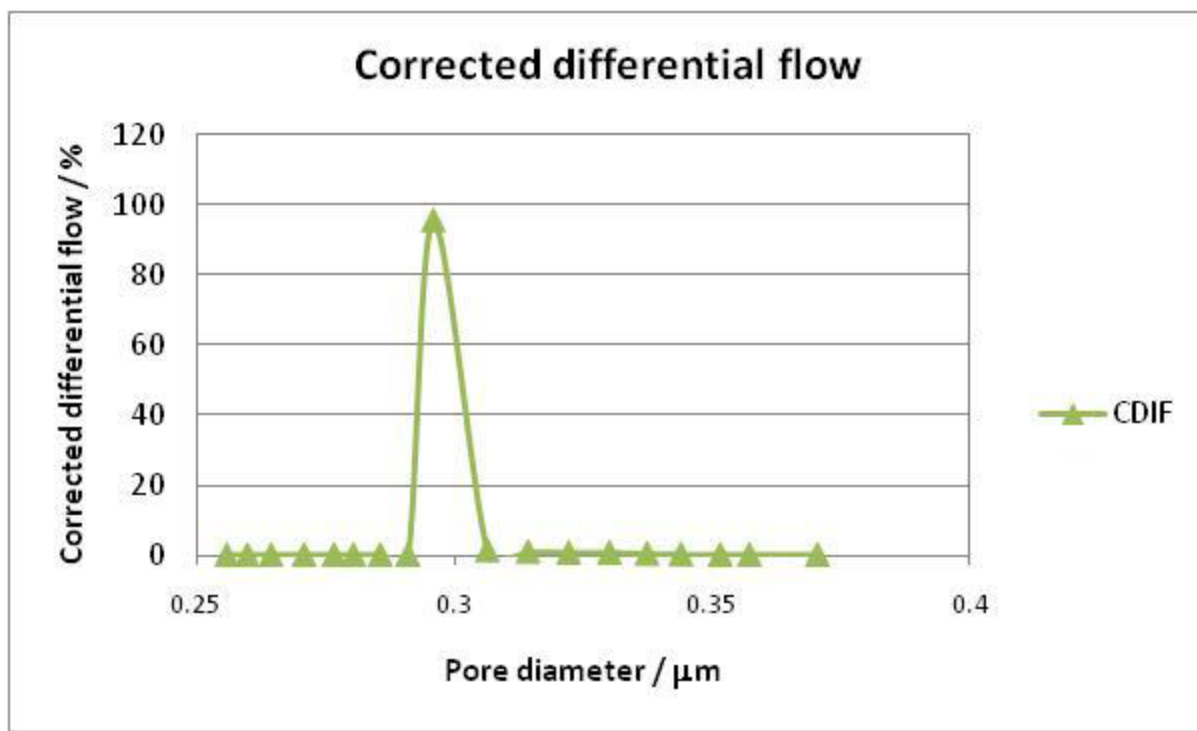
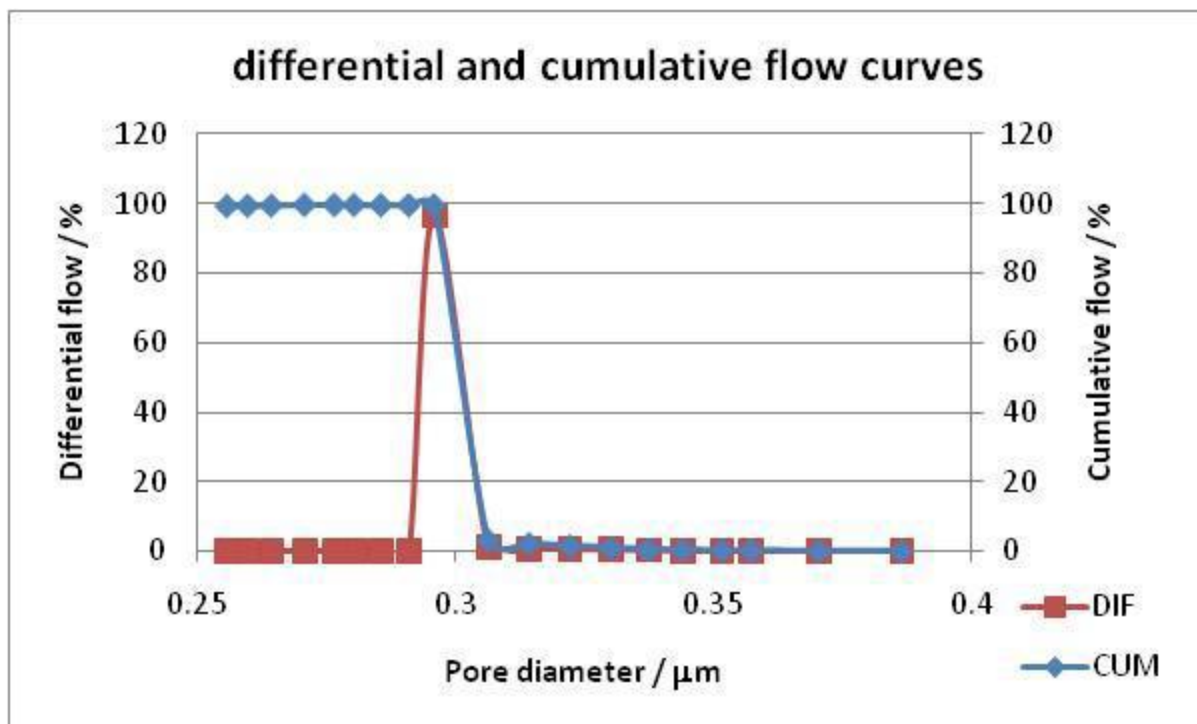
$$[DIF]_i = \left\{ \frac{\left( \frac{flow\ i + 1, wet}{flow\ i + 1, dry} - \frac{flow\ i, wet}{flow\ i, dry} \right)}{\sum_{j=0}^n \left( \frac{flow\ j + 1, wet}{flow\ j + 1, dry} - \frac{flow\ j, wet}{flow\ j, dry} \right)} \right\} * 100$$

$$[CUM]_i = \sum_{j=0}^i [DIF]_j$$

$$[CDIF]_i = \left\{ \frac{\frac{[DIF]_i}{pore\ size\ (i) - pore\ size\ (i + 1)}}{\sum_{j=0}^n \frac{[DIF]_j}{pore\ size\ (j) - pore\ size\ (j + 1)}} \right\} * 100$$

Рисунок 4: Математические уравнения для расчета дифференциальной, интегральной и корректирующей дифференциальной кривых





## **Вывод:**

Было показано, что при использовании смачивающей жидкости на основе перфторэфигов, можно существенно снизить прилагаемое давление при измерении пор маленького диаметра, поскольку поверхностное натяжение у таких жидкостей существенно ниже, чем у спиртов и воды.

В приборе с пошаговой стабилизацией давления **POROLUX™ 1000**, можно не использовать корректирующие факторы формы и кривизны, поскольку в нем имеется возможность удерживать нужное давление в течение заданного промежутка времени, что способствует освобождению от жидкости в порах разной длины, но одинакового диаметра, при одном и том же давлении. Более того, изменяя время стабилизации, мы можем косвенно получить данные о пористой структуре материала.

Полученные результаты отображаются в виде интегральных и дифференциальных кривых распределения пор по размеру

*В написании статьи использованы материалы, представленные на сайте [www.porometer.com](http://www.porometer.com)  
При копировании любых материалов, ссылка на источник обязательна!*