ОСНОВЫ ФИЛЬТРАЦИИ. НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ СТАТЬЯ. ЧАСТЬ 2

4. Система оценки эффективности фильтров с помощью коэффициента фильтрации Бета (β)
Несмотря на то, что абсолютная тонкость фильтрации намного понятней и полезней номинальной, более новой системой для оценки эффективности фильтров является определение коэффициента фильтрации – Бета (β). Коэффициент фильтрации Бета определяется с помощью «теста OSU F-2 для определения характеристик фильтра», разработанного Оклахомским государственным университетом. Разработанный изначально для тестирования фильтров масел гидравлических и смазочных систем, тест был приспособлен корпорацией Pall для быстрого полуавтоматического тестирования фильтров для различных жидкостей, в т. ч. на водной основе и масел.
Система оценки эффективности фильтров по коэффициенту фильтрации проста по идее и подходит для измерения и прогнозирования характеристик самых разных фильтрующих элементов в определенных условиях тестирования.
Если в потоке до фильтра и за ним посчитать все частицы тестового загрязнения для нескольких различных размеров частиц, то для любого фильтрующего элемента можно построить профиль эффективности фильтрации. На рис. 9 показана установка для однопроходного теста определения коэффициента фильтрации Бета.

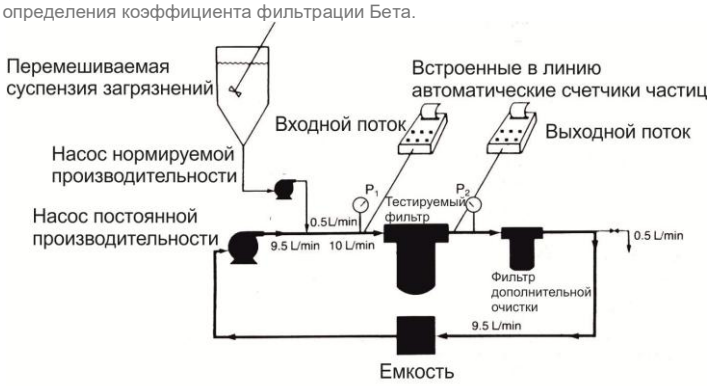


Рисунок 9. Схема установки для однопроходного теста коэффициента фильтрации бета (β).
Коэффициент эффективности фильтрации определяется следующим образом:
β = количество частиц определенного размера перед фильтром / количество частиц определенного размера после фильтра.
Эффективность фильтрации частиц определенного размера в процентах может быть получена непосредственно из коэффициента β:
Эффективность фильтрации % = (β-1)/β × 100.

Соответствие между β и эффективностью фильтрации в процентах приведена в таблице ниже.

β	Эффективность фильтрации %
1	0
2	50
10	90
100	99
1.000	99,9
10.000	99,99
100.000	99,999

Обычно β = 5.000 – 10.000 можно использовать в качестве действующего определения абсолютной эффективности фильтрации.
Коэффициент β позволяет сравнивать эффективность различных фильтрующих элементов по частицам разных размеров с помощью значимой информации. На рис. 10 приведены типичные графики β для трех различных фильтроэлементов.

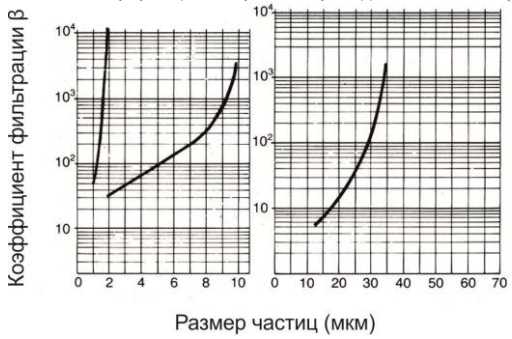


Рисунок 10. Графики зависимости коэффициента β от размера частиц тестового загрязнения

Правильный выбор фильтра

Наиболее важными факторами, которые необходимо принять во внимание при выборе фильтра для конкретного применения являются: размер, форма и твердость подлежащих удалению частиц, количество этих частиц, тип и объем фильтруемой жидкости, рабочий расход,

характер расхода (постоянный, переменный и/или неравномерный), давление в системе, а также химическая совместимость фильтрующего материала с жидкостью, температура жидкости, свойства самой жидкости, доступное пространство для размещения частиц загрязнения (пористость) и требуемая эффективность фильтрации. Рассмотрим, как некоторые из этих факторов влияют на выбор фильтра.

1. Тип фильтруемой жидкости

Материалы, из которых изготовлен фильтрующая среда, каркас фильтроэлемента и корпус фильтра должны быть совместимыми с фильтруемой жидкостью. Жидкости могут вызвать коррозию металлического сердечника сменного фильтроэлемента или корпуса фильтра, а продукты коррозии, в свою очередь, загрязнить фильтруемую жидкость. Поэтому важно знать, что входит в состав фильтруемой жидкости: кислота, щелочь, водная или масляная основа, присутствуют ли растворители и т. д.

2. Расход

Расход представляет собой движение объема жидкости в единицу времени (единицы измерения – мл/мин, л/мин, галлон/мин и т. д.) и зависит от двух основных параметров – давления [P] и сопротивления [R]. Расход прямо пропорционален давлению и обратно пропорционален сопротивлению. Следовательно, при постоянном R расход растет с увеличением P. При постоянном P расход растет с уменьшением R.

Давление в системе может создаваться несколькими разными источниками. Измеряется давление в барах, килопаскалях (кПа) или фунтах на квадратный дюйм (psi). Если давление увеличивается, то при прочих равных условиях расход жидкости будет также расти.

Вязкость – это сопротивление жидкости перемещению молекул жидкости между собой. Другими словами – это мера густоты жидкости или сопротивления жидкости потоку. Вода, эфиры и спирты обладают низкой вязкостью; тяжелые масла и сиропы – высокой. Вязкость непосредственно влияет на сопротивление. Если все остальные параметры неизменны, то двукратное увеличение вязкости фильтруемой жидкости приведет к двукратному увеличению гидравлического сопротивления фильтра. Следовательно, если вязкость жидкости растет, то для поддержания постоянного расхода необходимо увеличение давления. Динамическая вязкость измеряется в сантипуазах. 1 сПз (сантипуаз) - это вязкость воды при температуре 21°C.

3. Температура

Температура, при которой происходит фильтрация, может одновременно влиять на вязкость жидкости, на скорость коррозии корпуса фильтра и на совместимость фильтрующего материала с фильтруемой жидкостью. Обычно с ростом температуры вязкость жидкостей уменьшается. Если вязкость жидкости очень высока, то для улучшения фильтрации может оказаться полезным предварительный подогрев жидкости нагревателями, устанавливаемыми в системе фильтрации. При выборе фильтра важно учитывать вязкость жидкости именно при ее предполагаемой рабочей температуре.

Высокая температура способствует ускорению коррозии, а также ослабляет уплотнения корпусов фильтров. Довольно часто фильтрующие материалы фильтроэлементов не способны выдерживать высокие температуры, особенно, в течение длительного времени. Это является одной из причин, по которой во многих случаях следует применять пористые металлические фильтроэлементы.

4. Падение давления (гидравлическое сопротивление)

Все, через что протекает жидкость вносит свой вклад в общее сопротивление потоку жидкости. Общее падение давления складывается из падений давления на трубопроводах, соединениях трубопроводов, а также на фильтре.

Гидравлическое сопротивление чистого фильтра складывается из сопротивлений его корпуса, каркаса фильтроэлемента и фильтрующего материала. Для жидкости определенной вязкости фильтрующий материал с меньшими размерами пор или каналов будет создавать больше сопротивление потоку. При протекании жидкости через фильтр, результатом является падение давления и давление в линии за фильтром становится меньше. Падение давления на фильтре называется дифференциальным давлением или ΔP. Таким образом, на практике можно использовать любой из терминов: перепад давления, падение давления, дифференциальное давление или ΔP. Все эти термины являются синонимами.

При одинаковом расходе дифференциальное давление на фильтре будет выше, если выше гидравлическое сопротивление фильтрующего материала. Так как поток направлен всегда в сторону более низкого давления, дифференциальное давление будет способствовать течению жидкости. Это то самое дифференциальное давление, которое, преодолевая сопротивление фильтра, заставляет жидкость проходить через него.

В предыдущих рассуждениях мы считали, что в жидкости совершенно нет твердых примесей. В реальности же в гидравлических системах всегда присутствуют посторонние частицы. Работа фильтра заключается в задержании частиц загрязнения, поэтому задержанные частицы частично или полностью перекрывают поры или ячейки фильтрующего материала, увеличивая гидравлическое сопротивление фильтра и перепад давления ΔP.

Следовательно, выбирая фильтр, нужно позаботиться и об источнике, способном создать достаточное давление не только для преодоления начального сопротивления фильтра, но и для поддержания требуемого расхода жидкости вплоть до полного использования эффективной грязеемкости фильтра, означающей максимально допустимое перекрытие пор фильтрующего материала. *Если соотношение перепада давлений на чистом фильтре к максимальному доступному давлению чрезмерно велико, расход быстро упадет до неприемлемо низкого значения, даже при неполном использовании ресурса (грязеемкости) фильтрующего материала.* В этом случае обычно нелбходимо увеличить максимальное рабочее давление насоса или гравитационный напор. Можно также уменьшить начальное падение давления на чистом фильтре, выбрав фильтр большего размера.

Типичная экспоненциальная зависимость падения давления на фильтроэлементе от количества накопленных загрязнений показана на рис. 11.

Обычно большая часть грязеемкости фильтроэлемента расходуется до резкого увеличения падения давленя. Следовательно, для максимального использования ресурса фильтрующего элемента (грязеемкости) источник давления в системе должен обеспечивать давление не меньше перепада ΔP в районе резкого изгиба показанной на рис. 11 зависимости.



Рисунок 11. Типичная зависимость падения давления на фильтроэлементе от грязеемкости

Максимально допустимый перепад давления на фильтроэлементе – значение, превышение которого ради поддержания требуемого расхода жидкости может привести к разрушению фильтрующего элемента. Предельное значение перепада давления всегда указывается производителем фильтра.
При выборе источника давления следует учитывать, что гидравлическое сопротивление фильтра складывается из постоянного сопротивления таких компонентов, как корпус фильтра и каркас фильтрующего элемента и из переменного сопротивления фильтрующего материала и фильтрующего намывного слоя (фильтрующего пирога). Так как фильтрация протекает при постоянном расходе, перепад давления на фильтре, складывающийся из постоянной и увеличивающейся переменной составляющей, будет увеличиваться. Переменная составляющая постепенно растет – до тех пор, пока фильтрующий материал не заблокируется полностью и перестанет пропускать жидкость или пока он не разрушится механически. Возможный перепад давлений, обеспечиваемый насосом, должен перевешивать обе составляющие как минимум до полного блокирования фильтра.
Если в линии за фильтром присутствует гидростатический напор, как, например, в случае приподнятой относительно фильтра приемной емкости, он должен быть преодолен, но не за счет ограничения преодолеваемого перепада давлений на фильтре. В таких случаях за фильтром необходимо устанавливать обратный клапан, исключающий возможность повреждения фильтроэлемента обратным давлением.
Как уже замечено выше, перепад давления на фильтре можно снизить, используя фильтр большего размера. Такой подход обычно более выгоден экономически для непрерывных технологических процессов, т. к. эффект от увеличения пропускной способности такого фильтра часто растет быстрее расходов на большее количество фильтроэлементов в больших корпусах (см. далее).

5. Площадь поверхности фильтрации

Из предыдущего раздела о перепаде давления должно быть понятно, что ресурс фильтра напрямую связан с грязеемкостью, которую NFPA определяет как «массу определенного искусственного загрязнителя, который должен быть добавлен в поток перед фильтром для создания заданного дифференциального давления на фильтре при определеных условиях». Хотя грязеемкость можно определять, используя любой загрязнитель с определенными свойствами, для этой цели чаще всего используют мелкодисперсную тестовую пыль (ACFTD).[5]
5 Полный перепад давления на фильтре со сменным фильтроэлементом определяется суммой перепадов давлений на корпусе, фильтрующем материале и сердечнике фильтрующего элемента. Для упрощения в этом примере рассматривается перепад давления только на компонентах с переменным гидравлическим сопротивлением, но не учитываются перепады давлений на корпусе фильтра и сердечнике фильтроэлемента (компоненты с постоянным гидравлическим сопротивлением). Вклад в общий перепад давления компонентов с постоянным гидравлическим сопротивлением уменьшается с увеличением размеров фильтра, но это в данном случае не очень важно.
Ресурс большинства сетчатых фильтров и фильтров с фиксированными порами существенно увеличивается при увеличении площади поверхности фильтрации. В действительности это соотношение может быть пропорционально квадрату соотношения площадей. Чтобы понять, почему это так, рассмотрим два фильтра *из одинакового фильтрующего материала* (соответственно, с одинаковым предельным перепадом давления), фильтрующих одну и ту же жидкость при одинаковых расходах (рис.12).
Площадь первого фильтра (рис. 12а) равна 1 м², и за определенное время на фильтрующем материале образуется фильтрующий слой из загрязнений толщиной «t». Предположим, что перепад давлений на фильтрующем элементе увеличился до установленного предельного значения 2 бара, т. е. ресурс фильтра исчерпан.
Теперь давайте сравним этот фильтр с фильтром вдвое большей площади (рис. 12б) и определим ресурс второго фильтра. При идентичном расходе жидкости этот фильтр накопит вдвое больше загрязнений при той же толщине фильтрующего слоя из загрязнений.
Но при этом его ресурс не будет исчерпан, т. к. перепад давлений составит только 1 бар. Максимально допустимый перепад давлений 2 бара будет достигнут только при толщине фильтрационной корки 2t, т. е. при количестве накопленных загрязнений в 4 раза больше, чем в случае фильтра с вдвое меньшей площадью. Следовательно, увеличение площади поверхности фильтрации в два раза влечет четырехкратное увеличение ресурса фильтра.

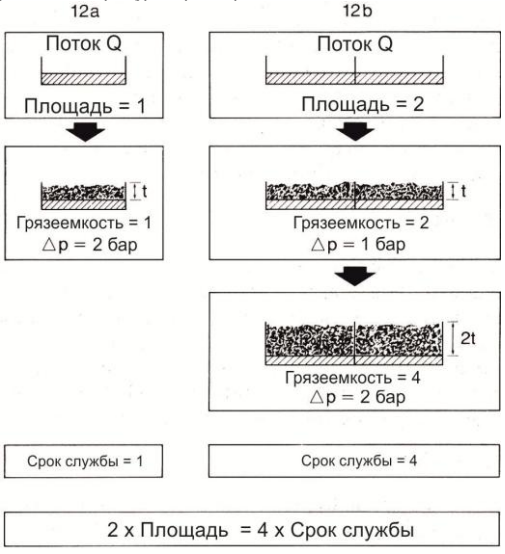


Рисунок 12. Эффект фильтрующего слоя. Преимущество при большей площади фильтрации

Преимущество выбора фильтра с большей площадью поверхности фильтрации можно показать следующей формулой:
Пусть T = максимальная пропускная способность жидкости для фильтра с площадью фильтрации A,
тогда:
$T_1 = T_2(A_1/A_2)n$,
где n больше или равно 1 и меньше или равно 2.
Эта зависимость показана графически на рис. 13. Из графика видно, что при снижении плотности потока (л/мин/м²), максимальная пропускная способность жидкости увеличивается. При условии постоянства расхода (л/мин) кратность плотностей потоков будет просто равна кратности площадей в степени n в точном соответствии с зависимостью, показанной выше.



Рисунок 13. Зависимость ресурса фильтра от плотности потока

Показатель увеличения ресурса (n) будет приближаться к 2 при следующих условиях:

а) Фильтрующий слой не может уплотняться. Если фильтрационный слой может уплотняться, параметр n будет стремиться к 1.

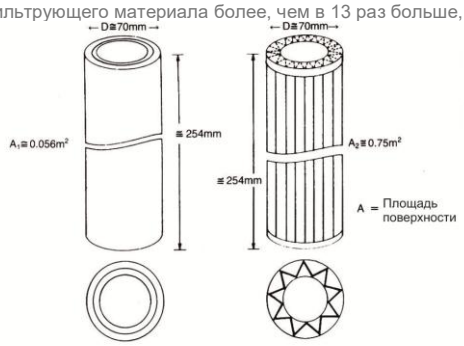
б) Сформированная фильтрующий слой не становится более тонким фильтром по сравнению с самим фильтрующим материалом (т. е. по мере роста фильтрующий слой не задерживает более мелкие частицы примесей). Если фильтрующй слой работает как фильтр более тонкий по сравнению с самим фильтроматериалом, n будет стремиться к 1.

с) Задержанные частицы имеют примерно одинаковые размеры.

Из вышеизложенного очевидно, что увеличение площади фильтрации даст как минимум пропорциональное увеличение ресурса фильтра. При удачном стечении обстоятельств кратность увеличения ресурса может достигнуть квадрата кратности увеличения площади фильтрации. Во многих, если не в большинстве случаев, пользователь фильтра может со временем получать экономию средства при высокой начальной стоимости большего фильтра!

Увеличение площади фильтрующего материала требует увеличения корпуса фильтра (резервуара или сосуда под давлением). Конечно же, существуют практические ограничения размеров корпуса фильтра.

Именно поэтому корпорация Pall в некоторых типах фильтров для размещения фильтрующего материала большей площади в небольшом объеме использует веерообразное и серповидное гофрирование фильтрующего материала, сохраняя таким образом небольшие размеры корпусов и минимизируя стоимость фильтров. На рис. 14 схематически показан фильтроэлемент с гофрированным фильтрующим материалом. Из схемы видно, что при одинаковых габаритах фильтроэлемента (70 мм x 254 мм) площадь поверхности гофрированного фильтрующего материала более, чем в 13 раз больше, чем обычного.



mm → мм

m^2 → $м^2$

Рисунок 14. Схема сменного фильтроэлемента с гофрированным фильтрующим материалом

Если использовать гофрированный фильтрующий материал невозможно, требуемый ресурс фильтра можно обеспечить за счет применения встроенных или отдельных предварительных фильтров.

6. Объем пустот

Объем пор или пустое пространство фильтрующего материала, является его важнейшей характеристикой. Фильтрующий материал с наибольшим объемом пор при прочих равных условиях будет наилучшим выбором с точки зрения наибольшего ресурса и наименьшего начального удельного перепада давления на чистом материале на единицу толщины материала. На рис. 15 показана связь между объемом пор материала и диаметром волокон.

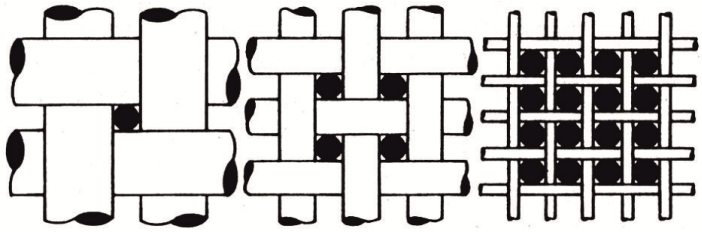


Рисунок 15. Зависимость объема пор от диаметра волокон при одинаковом размере пор

Для одинакового размера пор объем пор больше при меньшем диаметре волокон. При разработке каждого конкретного фильтра должны учитываться и другие факторы, такие как его прочность, сжимаемость фильтрующего материала, влияющая на уменьшение объема пор под действием давления, стоимость фильтрующего материала и конструкции фильтроэлемента, и т. д.

7. Эффективность фильтрации

Естественно, что фильтр должен обладать способностью удалять из жидкости загрязнения с такой эффективностью, которая предусмотрена конкретным технологическим процессом. После определения размеров частиц примесей, которые должны быть удалены, можно уже выбирать фильтр с требуемыми для конкретной задачи характеристиками. Выбор фильтра с размерами пор меньше необходимого может быть неправильным экономически. Нужно помнить, что более тонкий фильтр потребует более частой замены, и, следовательно, больших затрат!

Нужно также помнить, что выбранный фильтр должен не только задерживать частицы из жидкости, но и удерживать их. Как было замечено выше, фильтрующие материалы, поры которых могут увеличиваться под действием увеличивающегося перепада давления, могут выпускать накопленные загрязнения. Элемент с фиксированными порами означает выбор материала, структура которого не нарушается при резких изменениях условий фильтрации. Например, нити плетеной проволочной сетки должны быть скреплены, чтобы не допустить расширения ячеек при увеличении перепада давления, которое необходимо в системе для поддержания требуемого расхода при нарастании фильтрующего слоя из загрязнений. Недопустимы разрывы сетки под действием повышенного перепада давления, возможного в рассматриваемой системе.

[6] Объем пор часто путают с пористостью. Так как «пористость» давно используется в промышленности как для обозначения объема пор в процентах, так и для размера пор, мы стараемся не использовать этот термин.

Если в фильтрах с тонкими мембранами требуется слой для увеличения прочности мембран, следует обратить внимание на характеристики выбранного материала этого слоя. Несовместимые с фильтруемой жидкостью материалы могут вступать в реакции с ней, существенно увеличивая гидравлическое сопротивление и снижая ресурс фильтрующего элемента.

8. Предварительная фильтрация

Предварительная фильтрация применяется для снижения общих эксплуатационных расходов за счет увеличения срока эксплуатации финишного фильтра. Само по себе увеличение ресурса не может быть достаточным оправданием использования предварительной фильтрации. Как правило, основной целью является именно общее снижение затрат.

Наш многолетний опыт работы с заказчиками, желающими использовать предварительные фильтры, показывает, что во многих случаях более выгодным оказывается не использование предварительного фильтра, а увеличение площади основного фильтра. Объяснение этого было приведено выше: увеличение площади фильтрации всегда увеличивает ресурс фильтра и снижает расходы на эксплуатацию. Основной фильтр с удвоенной площадью поверхности фильтрации обладает ресурсом большим в 2 – 4 раза. Так как использование предварительного фильтра увеличивает ресурс основного фильтра лишь в полтора – два раза и очень редко в четыре раза, очевидно, что увеличение площади основного фильтра дает обычно больший эффект. Кроме того, такой подход снижает стоимость эксплуатации за счет сокращения трудозатрат, снижается расход энергии и перепад давления на фильтре. Цена снижается за счет использования одного корпуса вместо двух, а также за счет того, что больший по размеру фильтр имеет более длительный срок службы, возрастающий пропорционально увеличению площади фильтрации. Фильтр с большей площадью фильтрации обеспечивает также меньший перепад давления, в то время как предварительный фильтр увеличивает его. Потребляемая мощность снижается за счет меньшего перепада давления в течение большей части срока эксплуатации фильтра.

Кроме того, увеличение площади поверхности фильтрации финального фильтра влечет как минимум пропорциональный, а часто экспоненциальный рост ресурса, в то время как предварительная фильтрация, показывая хорошие результаты во время тестов, не всегда обеспечивает их на практике. Результаты удачного тестирования предварительного фильтра могут оказаться бесполезными из-за изменения с течением времени природы загрязнения.

Однако, так как по некоторым причинам увеличить площадь основного фильтра не возможно, могут быть опробованы различные фильтрующие элементы Pall, рассчитанные на применение в качестве предварительных. Рекомендуемые характеристики предварительного фильтра приводятся в справочной литературе Pall. Возможно, что более эффективным окажется использование ступенчатой фильтрации, реализуемой в предварительном фильтре за счет его многослойности, как, например, в случае HDC, Profile и стекловолоконных предварительных фильтров, производимых корпорацией Pall.

Не следует заблуждаться в том, что перед основным фильтром должен быть всегда установлен один предварительный фильтр с одним фильтроэлементом. Часто использование большего числа фильтроэлементов для предварительного фильтра существенно снижает общие затраты. Например, если режим работы системы предусматривает использование предварительных фильтров до полного их блокирования, то два фильтроэлемента обеспечат увеличение ресурса более, чем в два раза, а, возможно, в четыре-пять раз. Это, в свою очередь, уменьшит эксплуатационные расходы, т. к. на каждый фильтроэлемент придется большее количество очищенной жидкости.

Выводы

Данная статья посвящена объяснению основ фильтрации. Мы рассмотрели три механизма задержания из взвешенных частиц фильтруемой среды и показали, что наилучшим механизмом в случае фильтрации жидкостей является непосредственное задержание, в то время как

инерционное соударение и диффузионное задержание более эффективны при фильтрации газов. За счет выбора определенных качеств системы «загрязнение-жидкость-фильтрующий материал» возможно повышение эффективности фильтрации. Рассмотрены три возможности повышения эффективности фильтров. В связи с несовершенством применяемой классификации фильтрующих материалов в статье рассмотрено разделение фильтрующих материалов на материалы с фиксированными и нефиксированными порами и объяснено почему такая классификация более понятна по сравнению с простым разделением фильтрующих материалов на глубинные и поверхностные. После описания различных типов, применяемых в настоящее время фильтров, было необходимо рассмотреть вопрос эффективности. В статье проанализированы три системы определения эффективности фильтрации: номинальная тонкость фильтрации, абсолютная тонкость фильтрации и коэффициент фильтрации Бета. Статья завершается рассмотрением наиболее важных факторов, которые должны приниматься во внимание при выборе фильтра.