

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОНКОСТИ ОТСЕВА ТКАНЫХ ФИЛЬТРОВАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ СИНТЕТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН РАСЧЁТНЫМ МЕТОДОМ

В. Г. КОСТЕНИЧ

УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»,
г. Минск, Республика Беларусь, 220023, e-mail: kaf.tia@bsatu.by

В. А. БЕЛОУСОВ, А. В. ГОРДЕЕНКО

УО «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции
и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия»,
г. Горки, Республика Беларусь, 213407, e-mail: ktrauto@tut.by

А. В. ЗАХАРОВ

УО «Белорусский национальный технический университет»,
г. Минск, Республика Беларусь, 220013, e-mail: gra_atf@bntu.by

(Поступила в редакцию 16.06.2025)

Износ основных деталей двигателей внутреннего сгорания автомобилей, тракторов, строительных, сельскохозяйственных и других машин имеет преимущественно абразивный характер и вызывается абразивными частицами загрязнений, проникающими в двигатель вместе с воздухом, топливом и маслом, а также находящимися в смазочном масле продуктами износа деталей. Присутствие в смазочном масле загрязнений в виде мелкодисперсных частиц с высокой твердостью значительно ускоряет процесс износа и может привести к аварийному выходу двигателя из строя, поэтому в систему смазки любого двигателя внутреннего сгорания входят агрегаты очистки масла (маслоочистители). Одной из основных характеристик, определяющих качество очистки смазочного масла маслоочистителями, является их тонкость отсева.

В статье рассмотрены методы и способы очистки масла в двигателях внутреннего сгорания при помощи фильтров различных конструкций и с разными фильтровальными материалами; методы определения герметичности фильтров, их сопротивления потоку воздуха, пористости материалов и дана их сравнительная оценка.

В работе предлагается метод определения средней тонкости отсева тканых фильтровальных материалов, изготовленных из синтетических волокон одинакового диаметра. Исследована связь тонкости отсева тканого фильтрующего материала с его пористостью и диаметром волокон. Используя полученную формулу, можно определить среднее расстояние d_n между волокнами ткани, которое соответствует средней тонкости отсева фильтрующего материала. По полученным формулам выполнены расчёты отношения среднего диаметра пор к диаметру волокна в зависимости от угла расположения волокон α и пористости фильтрующего материала Π , результаты которых представлены в таблице.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, система смазки, очистка масла, фильтр, тонкость отсева.

Wear of the main parts of internal combustion engines of cars, tractors, construction, agricultural and other machines is predominantly of an abrasive nature and is caused by abrasive particles of contaminants penetrating the engine together with air, fuel and oil, as well as by wear products of parts contained in the lubricating oil. The presence of contaminants in the form of finely dispersed particles with high hardness in the lubricating oil significantly accelerates the wear process and can lead to emergency failure of the engine, therefore, the lubrication system of any internal combustion engine includes oil cleaning units (oil purifiers). One of the main characteristics determining the quality of lubricating oil purification by oil purifiers is their sifting fineness.

The article considers methods and techniques for purifying oil in internal combustion engines using filters of various designs and with different filter materials; methods for determining the tightness of filters, their resistance to air flow, porosity of materials, and provides a comparative assessment.

The paper proposes a method for determining the average sifting fineness of woven filter materials made of synthetic fibers of the same diameter. The relationship between the sifting fineness of a woven filter material and its porosity and fiber diameter was investigated. Using the obtained formula, it is possible to determine the average distance d_n between the fibers of the fabric, which corresponds to the average sifting fineness of the filter material. According to the obtained formulas, the ratio of the average pore diameter to the fiber diameter was calculated depending on the angle of the fibers α and the porosity of the filter material Π , the results of which are presented in the table.

Key words: internal combustion engine, lubrication system, oil purification, filter, sifting fineness.

Введение

Ресурс двигателя внутреннего сгорания (ДВС) на 80 % обусловлен износом его деталей, при этом износ деталей, вызываемый абразивными частицами загрязнений, достигает 60–80 % от общего износа в зависимости от запылённости воздуха [1]. Поэтому для уменьшения износа деталей двигателя и увеличения наработки до капитального ремонта в процессе его работы должна осуществляться непрерывная очистка масла, которая применяется на всех без исключения современных двигателях.

Маслоочистители (МО) должны обеспечивать удаление из смазочного масла опасных продуктов загрязнений и полную защиту ответственных трущихся пар и механизмов от их вредного воздействия

[2]. По принципу действия МО можно разделить на фильтры и силовые очистители. Для изготовления фильтров применяют сетки различных конструкций, навитую с определённым шагом металлическую проволоку или профильную ленту, набор пластин из различных материалов, металлокерамику, порошковые материалы, специальные фильтровальные бумаги и картоны и т.д. Фильтры грубой очистки являются полнопоточными и устанавливаются последовательно в циркуляционном контуре. Фильтры тонкой очистки устанавливаются или последовательно, или параллельно контуру циркуляции масла (на ответвлении). Из силовых МО наибольшее распространение получили центробежные очистители с активным и реактивным гидравлическим приводом ротора. Основными недостатками силовых очистителей является относительная сложность их конструкции, требуемая высокая точность изготовления, повышенные затраты мощности на гидропривод ротора [2]. Общим недостатком как фильтров, так и центрифуг является их низкая эффективность в начальный период (чистый фильтр, пустой ротор) и, особенно, при холодном пуске двигателя.

В работе [3] предлагается использование фильтрующих элементов из углеродных тканей для очистки масла в ДВС. Углеродные ткани обладают большой прочностью на разрыв, высокой химической стойкостью в агрессивных средах, хорошей тепло- и электропроводностью, стойки к воздействию высоких температур. При использовании предлагаемого фильтра в системе смазки двигателя появляется возможность его регенерации, которая осуществляется без разборки фильтра; а также подогрева масла, проходящего через фильтр, при пуске холодного двигателя.

Одной из основных характеристик, определяющих фильтрационные свойства ткани, является тонкость отсева. Тонкость отсева средняя (номинальная) характеризуется размером монодисперсных частиц загрязнителя, для которых полнота отсева равна 50 % (95 %) [4]. Средняя тонкость отсева зависит от диаметра пор фильтрующего материала или, для волокнистых материалов, от среднего расстояния между волокнами ткани.

Целью исследования является изучение влияния пористости и диаметра волокна тканого фильтровального материала на его тонкость отсева и разработка методики определения тонкости отсева тканых фильтровальных материалов из синтетических волокон расчётным методом.

Основная часть

Существуют различные методики для определения тонкости отсева фильтровальных бумаг и картонов, образованных хаотически, неупорядоченно сложенными частицами или волокнами неправильных геометрических форм. Так, например, в методе определения герметичности [5] в качестве косвенного показателя используется давление проскока первого пузырька, которое пересчитывается в абсолютную тонкость фильтрации, соответствующую условному диаметру максимальной поры фильтрующего материала, по формуле:

$$D = \frac{4\sigma \cdot 10^3}{\Gamma}, \text{ мкм}, \quad (1)$$

где σ – поверхностное натяжение испытательной жидкости, мН/м; Γ – герметичность, Па.

Поверхностное натяжение σ находят по формуле:

$$\sigma = 51,5\rho - 16,6, \text{ мН/м}, \quad (2)$$

где ρ – плотность испытательной жидкости, г/см³.

Метод определения сопротивления потоку воздуха [6] основан на определении перепада давления воздуха, проходящего через испытуемый образец с заданной скоростью. Этот метод позволяет оценивать и сравнивать только гидравлическое сопротивление различных фильтрующих материалов, но не даёт возможности определить их тонкость отсева.

В работе [7] авторами установлена однозначная зависимость средней тонкости фильтрации пористых перегородок от коэффициента проницаемости K , который рассчитывается по формуле:

$$K = \frac{Q\mu l}{Fp}, \quad (3)$$

где Q – расход жидкости (воздуха), см³/с; μ – динамическая вязкость жидкости, Па·с; l – толщина пористой перегородки, см; F – площадь пористой перегородки, см²; p – гидравлическое сопротивление пористой перегородки, Па.

Средняя тонкость фильтрации определяется по формуле:

$$\delta_0 = \frac{\lg(K \cdot 10^8) - 0,3459}{0,0754}, \text{ мкм}. \quad (4)$$

Однако, как отмечается авторами, данная зависимость может быть применена лишь для ограни-

ченного интервала тонкости отсева от 2,5 до 27 мкм.

Наиболее достоверные результаты по определению тонкости отсева фильтрующих материалов даёт метод микроскопического анализа фильтрата, отобранного перед фильтрующей перегородкой и после неё. Однако применение этого метода связано с определёнными трудностями: необходимостью специального оборудования и приборов и значительной трудоёмкостью проведения микроскопического анализа.

Нами предлагается метод определения средней тонкости отсева тканых фильтрующих материалов, изготовленных из синтетических волокон одинакового диаметра. Тонкость отсева тканого фильтрующего материала зависит от диаметра волокна нити, из которой изготовлена ткань, и пористости ткани. Рассмотрим, как связана тонкость отсева тканого фильтрующего материала с его пористостью и диаметром волокон.

Пусть мы имеем некоторый объём ткани V_t . Будем считать, что ткань состоит из одинаковых волокон диаметром d и длина волокон l значительно превышает их диаметр, то есть $l \gg d$. Волокна, находящиеся в объёме ткани V_t , будут занимать объём V_v . Тогда общий объём пор, заключённых в объёме ткани V_t , будет равен разности между объёмом ткани V_t и объёмом волокон V_v , заключённых в данном объёме ткани:

$$V_{\Pi} = V_t - V_v. \quad (5)$$

Отношение объёма пор к объёму ткани называется пористостью, то есть:

$$\Pi = \frac{V_{\Pi}}{V_t} = \frac{V_t - V_v}{V_t} = 1 - \frac{V_v}{V_t}. \quad (6)$$

Для определения пористости ткани воспользуемся методикой академика Лейбензона Л.С. [8]. Расположение волокон в нити ткани может изменяться между двумя крайними положениями, первое из которых соответствует максимально плотному размещению волокон (рис. 1а), а второе – наиболее свободному (рис. 1б).

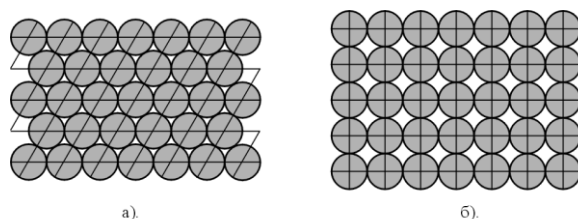


Рис. 1. Расположение волокон ткани в поперечном сечении

Рассмотрим элементарный участок сечения ткани, в который будут входить четыре расположенных рядом волокна. В первом случае будем считать, что волокна ткани соприкасаются друг с другом. Так как все волокна имеют одинаковый диаметр, то расстояние между центрами двух соприкасающихся волокон будет равно сумме их радиусов, или их диаметру (рис. 2).

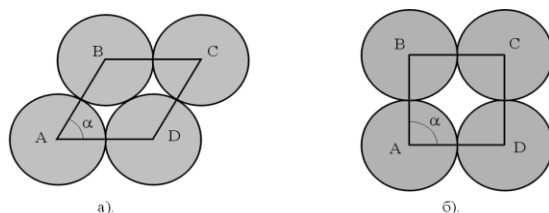


Рис. 2. Элементарная ячейка тканого фильтрующего материала

Очевидно, что центры волокон будут располагаться в вершинах ромба или квадрата $ABCD$ со стороной, равной диаметру волокна d и углом α , изменяющимся от 60° до 90° . Части волокон, находящиеся внутри ромба, при сложении их образуют целое волокно. Любое поперечное сечение пучка волокон может рассматриваться, как сумма множества элементарных участков в виде ромба (квадрата) $ABCD$ (рис. 3).

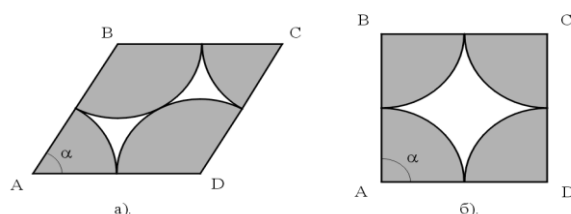


Рис. 3. Расчётная схема к определению пористости ткани в случае соприкосновения волокон

Пористость ткани может быть определена, как отношение объёма пор, заключённых в призме с

основанием $ABCD$ и высотой l , к объёму самой призмы:

$$\Pi = \frac{V_{\Pi}}{V_T} = \frac{S_{\Pi} \cdot l}{S_T \cdot l} = \frac{S_T \cdot l - S_B \cdot l}{S_T \cdot l} = 1 - \frac{S_B}{S_T}, \quad (7)$$

где S_T – площадь ткани в поперечном сечении, которую можно определить по формуле:

$$S_T = S_{ABCD} = d^2 \sin \alpha; \quad (8)$$

S_{Π} – площадь, занимаемая порами в поперечном сечении ткани;

S_B – площадь, занимаемая волокнами в поперечном сечении ткани, определяемая по формуле:

$$S_B = \frac{\pi d^2}{4}. \quad (9)$$

Тогда для пористости ткани имеем:

$$\Pi = 1 - \frac{\frac{\pi d^2}{4}}{d^2 \cdot \sin \alpha}, \quad (10)$$

и, после преобразований, окончательно получим:

$$\Pi = 1 - \frac{\pi}{4 \sin \alpha}. \quad (11)$$

При $\alpha = 60^\circ$ имеем $\Pi = 0,0931$; при $\alpha = 90^\circ$ соответственно $\Pi = 0,2146$. Из полученной формулы видно, что в случае соприкосновения волокон пористость ткани зависит только от их взаимного расположения, т.е. от угла α . Фильтрация жидкостей и газов через ткань осуществляется в направлении, перпендикулярном направлению волокон через щели между расположенными рядом волокнами.

Рассмотрим второй случай, когда волокна ткани не соприкасаются друг с другом, а расположены на расстоянии d_{Π} одно от другого, определяющем средний диаметр пор ткани (рис. 4).

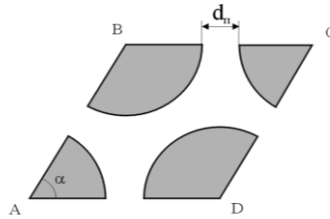


Рис. 4. Расчётная схема к определению пористости ткани в случае, когда волокна ткани не соприкасаются

Пористость в данном случае можно определить по аналогии с первым случаем по формуле (7). Площадь, занимаемая волокнами ткани, будет определяться так же, как и в предыдущем случае по формуле (9). Однако сторона ромба будет больше на величину d_{Π} , и, следовательно, площадь элементарной ячейки определится из выражения:

$$S_T = S_{ABCD} = (d + d_{\Pi})^2 \cdot \sin \alpha. \quad (12)$$

Тогда для пористости ткани получим следующее выражение:

$$\Pi = 1 - \frac{\frac{\pi d^2}{4}}{4(d + d_{\Pi})^2 \cdot \sin \alpha}. \quad (13)$$

Выразив из полученного выражения d_{Π} , будем иметь:

$$d_{\Pi} = d \cdot \left(\sqrt{\frac{\pi}{4(1 - \Pi) \cdot \sin \alpha}} - 1 \right). \quad (14)$$

Выполнив необходимые преобразования, окончательно получим: для случая с максимально плотным расположением волокон (при $\alpha = 60^\circ$):

$$d_{\Pi} = d \cdot \left(0,952 \sqrt{\frac{1}{1 - \Pi}} - 1 \right); \quad (15)$$

для случая с наиболее свободным расположением волокон (при $\alpha = 90^\circ$):

$$d_n = d \cdot \left(0,886 \sqrt{\frac{1}{1-\Pi}} - 1 \right). \quad (16)$$

Как первый случай с максимально плотным расположением волокон, так и второй с наиболее свободным их расположением, являются крайними или предельными. Наиболее вероятным, на наш взгляд, является расположение волокон с углом α , находящимся в середине интервала от 60° до 90° . Поэтому для расчётов может быть рекомендован угол расположения волокон $\alpha = 75^\circ$, и полученная формула примет вид:

$$d_n = d \cdot \left(0,902 \sqrt{\frac{1}{1-\Pi}} - 1 \right). \quad (17)$$

По полученным формулам (15–17) выполнены расчёты отношения среднего диаметра пор d_n к диаметру волокна d в зависимости от угла расположения волокон α и пористости фильтрующего материала Π , результаты которых представлены в таблице.

Отношение среднего диаметра пор d_n к диаметру волокна d в зависимости от угла расположения волокон α и пористости фильтрующего материала Π

Π	d_n/d		
	$\alpha = 60^\circ$	$\alpha = 75^\circ$	$\alpha = 90^\circ$
0,9	2,01	1,85	1,8
0,8	1,13	1,02	0,98
0,7	0,74	0,65	0,62
0,6	0,51	0,43	0,40
0,5	0,35	0,28	0,25
0,4	0,23	0,16	0,14
0,3	0,14	0,08	0,006
0,2	0,06	0,008	–
0,1	0,0035	–	–

Используя полученные данные, можно определить среднее расстояние d_n между волокнами ткани, которое соответствует средней тонкости отсева фильтрующего материала. Необходимые для расчёта диаметр волокна ткани d и пористость Π берутся из технической документации на материал. В случае отсутствия таких данных их можно получить экспериментально: диаметр волокна d замеряется при помощи микроскопа со специальной измерительной шкалой. Для определения пористости существует несколько методов: расчётный метод, основанный на определении плотности фильтрующего материала, метод пропитки, метод гидростатического взвешивания [9].

Заключение

Выполненные исследования позволили установить зависимость тонкости отсева тканого фильтровального материала от его пористости и диаметра волокон нити, из которой он изготовлен, а также разработать методику определения тонкости отсева тканых фильтровальных материалов из синтетических волокон расчётным методом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьев, М. А. Очистка масла в двигателях внутреннего сгорания / М. А. Григорьев. – М., 1983. – 148 с.
2. Венцель, С. В. Смазка и долговечность двигателей внутреннего сгорания / С. В. Венцель. – Киев: Техника, 1977. – 208 с.
3. Карташевич, А. Н. Методика определения пористости углеродных материалов / А. Н. Карташевич, А. В. Гордеев, В. Г. Костенич // Техническое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве: сборник научных статей Международной научно-практической конференции, Минск, 21-23 ноября 2018 г. – Минск: БГАТУ, 2018. – С. 253–256.
4. ОСТ 37.001.417-90. Фильтры тонкой очистки масла автомобильных, тракторных и комбайновых двигателей. Общие технические условия. – М.: НАМИ, 1991. – 21 с.
5. ГОСТ 21956-88. Бумага и картон фильтровальные. Метод определения герметичности. – М.: Издательство стандартов, 1988. – 5 с.
6. ГОСТ 25099-82. Бумага и картон фильтровальные. Метод определения сопротивления потоку воздуха. – М.: Издательство стандартов, 1982. – 7 с.
7. Пономарев, Н. Н. Основные показатели эффективности фильтровальных бумаг и методики их оценки / Н. Н. Пономарев, К. В. Рыбаков, Ю. А. Усанов // Двигателестроение. – 1988. – № 7. – С. 16–18.
8. Лейбензон, Л. С. Движение природных жидкостей и газов в пористой среде / Л. С. Лейбензон. – М.-Л.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1947. – 244 с.
9. Витязь, П. А. Фильтрующий материал: свойства, области применения, технология изготовления [Текст] / П. А. Витязь, В. М. Капцевич, Р. А. Кусин. – Минск: НИИ ПМ с ОП, 1999. – 304 с.