

УДК 621.315

UDC 621.315

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРИОДИЧНОСТИ  
ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ  
ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ  
ПО МАКСИМАЛЬНОЙ  
ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ФИЛЬТРА**

**MAINTENANCE PERIODICITY DEFINITION  
OF INTERNAL COMBUSTION ENGINE  
DEPENDING ON THE MAXIMUM  
PRODUCTIVITY OF THE FILTER**

Атрощенко Валерий Александрович  
д.т.н., профессор

Atroschenko Valeriy Aleksandrovich  
Dr.Sci.Tech., professor

Шевцов Юрий Дмитриевич  
д.т.н., профессор

Shevtsov Yuriy Dmitriyevich  
Dr.Sci.Tech., professor

Кобзева Светлана Александровна  
к.т.н.

Kobzeva Svetlana Aleksandrovna  
Cand.Tech.Sci.

Горохов Дмитрий Александрович  
к.т.н.  
*Кубанский государственный технологический  
университет, Краснодар, Россия*

Gorokhov Dmitriy Aleksandrovich  
Cand.Tech.Sci.  
*Kuban State Technological University, Krasnodar,  
Russia*

В статье рассматривается связь между степенью загрязнения масляного фильтра, его гидравлическим сопротивлением и средней величиной производительности фильтра за определенный промежуток времени. Установлено, что при снижении максимальной производительности фильтра необходимо проведение технического обслуживания двигателя внутреннего сгорания; именно с этой величиной связана периодичность технического обслуживания

In this article we study the connection between pollution extent of oil filter, hydraulic resistance and medium value of filter capacity for a certain period. We established following: if the maximum productivity of the filter is decreased, that maintenance of internal combustion engine is necessary. This value is connected with maintenance periodicity

Ключевые слова: ДВИГАТЕЛЬ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ, МАСЛЯНЫЙ ФИЛЬТР, ПЕРИОДИЧНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ, ЗАКОНЫ ФИЛЬТРОВАНИЯ, ПРОЦЕСС ЗАГРЯЗНЕНИЯ ФИЛЬТРОВ

Keywords: INTERNAL COMBUSTION ENGINE, OIL FILTER, MAINTENANCE PERIODICITY, FILTERING LAWS, POLLUTION PROCESS OF FILTERS

При назначении периодичности технического обслуживания (ТО) двигателей внутреннего сгорания (ДВС) учитывают два основных ограничивающих фактора. Первым фактором является ухудшение показателей физико-химических свойств моторного масла до недопустимых значений. Другим фактором является степень загрязнения масляного фильтра, изменяющаяся от начальной до предельно допустимой величины. От нее будет зависеть гидравлическое сопротивление фильтра, влияющее на давление в масляной магистрали системы смазки двигателя, что в свою очередь может изменить режимы трения и создать аварийную

ситуацию. В связи с этим оценка параметров, оценивающих физико-химические свойства моторного масла и степень загрязнения фильтра являются необходимыми в определении периодичности ТО ДВС.

Старение моторного масла, т.е. ухудшение показателей его физико-химических свойств, происходит за счет загрязнения его атмосферной пылью, продуктами износа, газообразными, жидкими и твердыми частицами, образующимися в процессе сгорания топлива, а также за счет загрязнения веществами, образующимися в результате химических и физико-химических изменений углеводородов базового масла и компонентов присадок, вводимых в эти масла [1,2].

Установление нормативных показателей допустимой концентрации элементов-индикаторов в масле даже для одной модели двигателя представляет сложную задачу и поэтому их использование должно сочетаться с анализом динамики изменения показателей износа по времени, степени загрязнения фильтра и его гидравлического сопротивления. При этом ставится задача отыскания функциональной зависимости концентрации продуктов загрязнений в масле  $X$  от времени работы двигателя  $t$ , час, скорости поступления загрязнений в систему смазки  $a$ , кг/час, от скорости их удаления из масла  $Q \cdot j$  при помощи фильтра, расхода масла на угар  $Q_y$ , кг/час, режимов долива и эффективности работы маслоочистителей  $j$ , о.е. Процентная концентрация продуктов износа в масле, также как и других нерастворимых в нем загрязняющих примесей, от времени работы  $t$  определяется выражением:

$$X = X_0 \cdot e^{\frac{Q \cdot j + Q_y}{V} \cdot t} + \frac{100a}{g(Q \cdot j + Q_y)} \left( 1 - e^{-\left(\frac{Q \cdot j + Q_y}{V} \cdot t\right)} \right), \quad (1),$$

где  $X_0$  - начальная концентрация продуктов износа в масле при  $t=0$ ;  
 $e$  - основание натурального логарифма;  $Q$  - скорость расхода масла через

фильтр;  $j$  - коэффициент отсева фильтра;  $Q_y$  - скорость расхода масла на угар;  $V$  - количество масла в двигателе;  $a$  - скорость поступления продуктов износа в масло;  $\gamma$  - удельный вес продуктов износа.

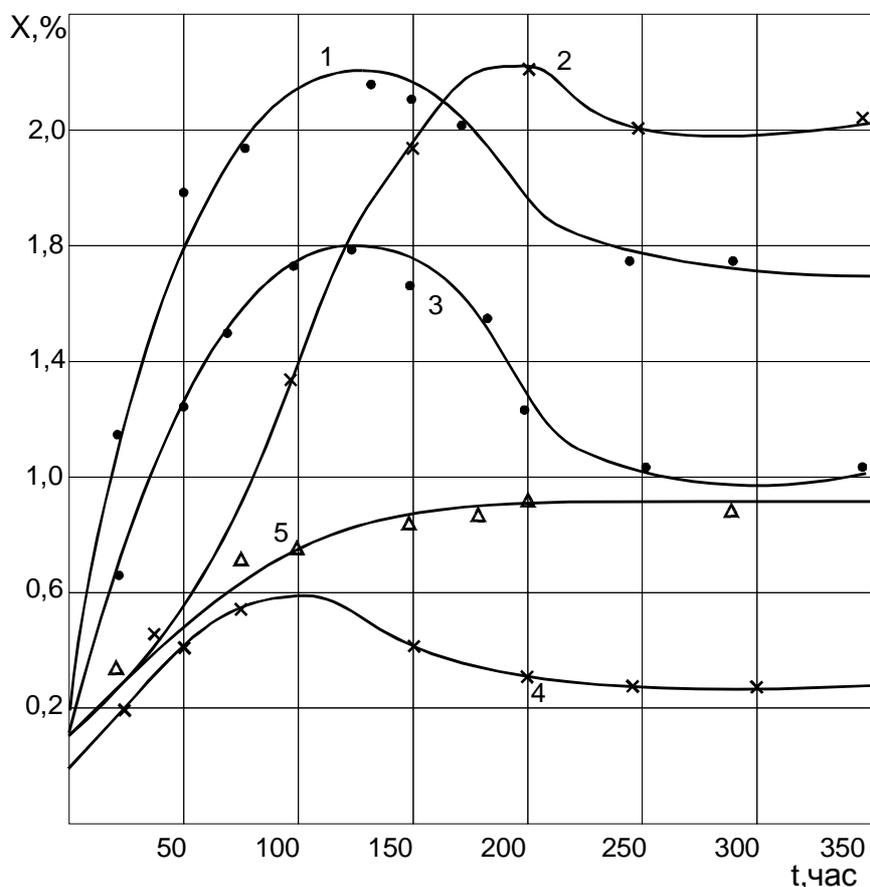


Рисунок 1 – Кинетика процесса накопления примесей в моторном масле без средств очистки и при его очистке полнопоточным фильтром в системе смазки дизелей (1 и 3 - дизель 2Ч 10,5/13 без средств очистки и с полнопоточным фильтром грубой очистки; 2 и 4 - дизель Ч8,5/11 без средств очистки и с полнопоточным фильтром тонкой очистки; 5 - дизель 6ЧН 12/14 с полнопоточным фильтром тонкой очистки).

При установившемся режиме, когда скорость поступления загрязнений и расход масла на угар можно считать постоянным, по характеру кривой накопления (рисунок 1) можно судить об эффективности, в первую очередь, системы очистки, а по текущей и

начальной величине концентраций загрязнений, можно определить остаточный ресурс масла и очистителей.

Очевидно, по характеру изменения кривой накопления примесей можно проводить лишь качественную оценку износа трущихся деталей двигателя и изменения интенсивности очистки (фильтрования) масла от загрязняющих примесей. Для эффективного и точного контроля технического состояния и оценки эффективности работы очистителей требуются более точные показатели.

Анализ опубликованных данных по экспериментальным и статистическим исследованиям [1, 2], позволил выявить закономерности распределения размеров частиц естественных загрязнителей в моторных маслах.

О нарушениях в функционировании тех или иных систем и узлов двигателя будет сигнализировать повышенная концентрация, дисперсный и качественный состав продуктов загрязнения, характеризующего возникновение неисправности в определенной системе или узле.

Работа масляного фильтра будет проходить по-разному в зависимости от тонкости очистки фильтрующих элементов, от динамики загрязнения масла продуктами износа и другими частицами и от их дисперсного состава. При работе масляного фильтра его фильтрующие элементы постепенно загрязняются. В результате изменяется полнота отсева фильтра, его гидравлическое сопротивление и пропускная способность. Для определения характера изменения этих показателей, в частности гидравлического сопротивления фильтра, рассмотрена возможность применения теории фильтрования по разделению суспензий для описания и оценки эффективности фильтрования моторного масла сетчатыми фильтрами в системах смазки двигателей внутреннего сгорания [1, 3]. С учетом динамики поступления примесей в масло, их концентрации, эффективности работы и тонкости очистки фильтра,

рассмотрены следующие законы фильтрования: а) с образованием осадка; б) с полным закупориванием пор; в) с постепенным закупориванием каждой поры (стандартный); г) промежуточный [1–3].

Каждому закону фильтрования соответствует определенная зависимость между расходом жидкости (масла) через фильтр  $Q$  или скоростью фильтрования  $W$ , перепадом давления на фильтре  $Dp$ , объемом фильтрата  $g$  и продолжительности фильтрования  $t$ .

Исследование процессов загрязнения масла [1, 2] в двигателях различной конструкции позволяет сделать вывод о том, что с учетом тонкости очистки фильтров ( $\delta = 20-250$  мкм) процесс загрязнения их фильтрующих элементов при нормальном функционировании двигателя идет по промежуточному закону фильтрования, когда фильтр удерживает частицы на поверхности фильтровальной перегородки и на внутренних стенках ее каналов (рисунок 2 г). При возникновении неисправностей двигателя концентрация элементов индикаторов в масле растет, и процесс фильтрования проходит уже по другим законам. Повышенный износ деталей цилиндра-поршневой группы и кривошипно-шатунного механизма сопровождается поступлением в масло мелкодисперсных частиц износа трущихся деталей. При этом имеет место фильтрование масла с постепенным закупориванием пор мелкодисперсными частицами (рисунок 2 в). В случае ухудшения рабочего процесса двигателя появляются частицы органического происхождения, которые по своим размерам совпадают с размерами пор и процесс фильтрования масла идет по закону полного закупоривания пор частицами соизмеримыми с их размером (рисунок 2 б).

Появление повышенной концентрации в масле продуктов усталостного износа и металлической стружки сопровождается фильтрованием масла по закону с образованием осадка на фильтрующей

перегородке из частиц размеры, которых гораздо больше размеров ее пор (рисунок 2 а).

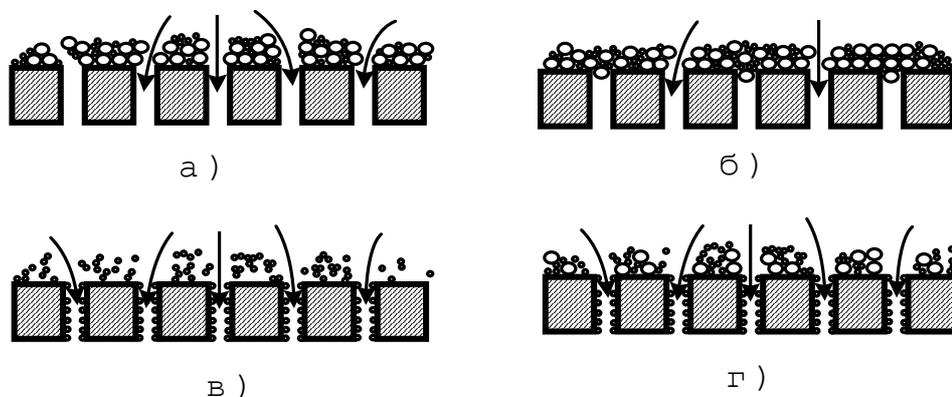


Рисунок 2 – Схемы осаждения частиц загрязнения на фильтрующей перегородке фильтра при различных законах фильтрации: а) с образованием осадка; б) полным закупориванием пор; в) с постепенным закупориванием каждой поры (стандартный); г) промежуточный.

Одним из наиболее важных оценочных показателей эффективности работы системы очистки масла является гидравлическое сопротивление фильтра, а точнее динамика его изменения в процессе эксплуатации. Оценка динамики изменения гидравлического сопротивления масляного фильтра осуществлялась на основе созданной его гидравлической модели, учитывающей особенности конструкции фильтра и колебательный характер течения жидкости (масла) в магистралях системы смазки. На основании такой модели гидравлическое сопротивление фильтра будет включать в себя активную составляющую сопротивления и динамические составляющие [1]. Активная составляющая гидравлического сопротивления фильтра, изменяется в процессе эксплуатации:

$$R_{\phi}(t) = \frac{d\Delta\overline{P}_{\phi}}{d\overline{G}}$$

и пропорциональна перепаду давлений на входе и выходе фильтра  $DP_\phi = P_{вх} - P_{вых}$  в соответствии с законом фильтрования. Где  $d\overline{DP}_\phi$  – амплитуда вариации перепада давления масла на входе и выходе фильтра;  $d\overline{G}$  – амплитуда вариации расхода масла в магистрали. Имея закономерности изменения перепада давления на фильтре от времени эксплуатации  $t$  и расхода масла в магистрали  $g$  для различных законов фильтрования можно получить закономерности изменения в процессе эксплуатации активной составляющей гидравлического сопротивления фильтра  $R_\phi(t)$ . Закономерности изменения перепада давления на фильтре при различных законах фильтрования будут описываться уравнениями [1, 3]:

$$\left. \begin{array}{l} \text{а) } \Delta P = K_4 g \\ \text{б) } \Delta P = \frac{\Delta P_0 K_3}{K_3 - g}, \\ \text{в) } \Delta P = \frac{1}{\left( \left( \frac{1}{\Delta P_0} \right)^{0,5} - \frac{1}{K_2} g \right)^2}, \\ \text{г) } \Delta P = \Delta P_0 e^{-K_1 \cdot g} \end{array} \right\} (2),$$

где  $DP = DP_\phi$  – перепад давления масла на фильтре;  $DP_0$  – перепад давления масла на фильтре при  $t = 0$ ;  $K_1 K_2 K_3 K_4$  - постоянные, характеризующие закон фильтрования;  $g$  - объем масла, проходящий через единицу поверхности фильтра.

На рисунке 3 представлены, полученные в результате экспериментальных и аналитических исследований, графические зависимости изменения активной  $R_\phi(t)$  составляющей гидравлического сопротивления сетчатого масляного фильтра от времени его работы при различных условиях эксплуатации, при различной степени исправности и интенсивности износа в соответствии с законом фильтрования.

Другим важнейшим показателем эффективности работы системы очистки масла является условная средняя производительность (скорость)

фильтрации, представляющая собой отношение массы загрязняющих примесей  $M$ , отфильтрованной из масла фильтром за определенный период его работы с  $1 \text{ м}^2$  поверхности фильтрации на общую продолжительность цикла  $t_u$ , т.е.  $W_{\text{фсп}} = \frac{M}{F_{\text{ф}} t_u}$  [1,3].

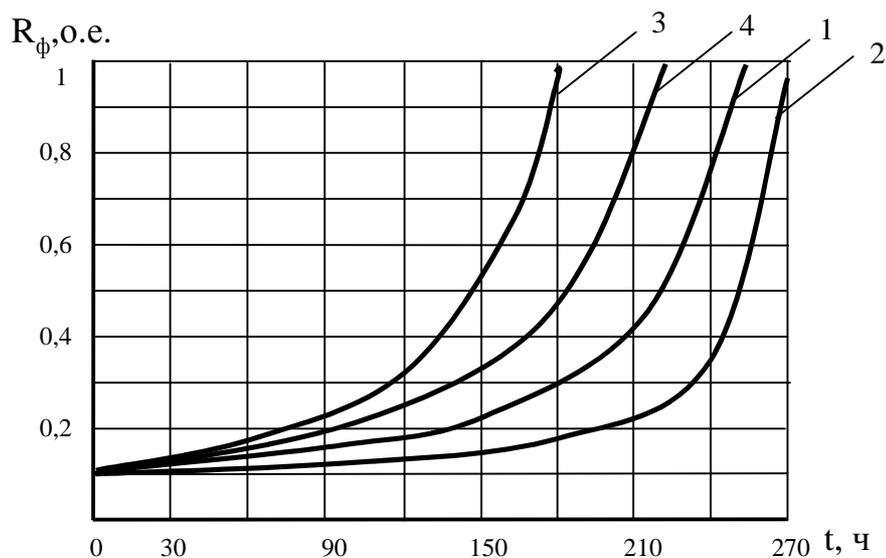


Рисунок 3 – Изменение активной составляющей гидравлического сопротивления фильтра в соответствии с законами фильтрации (1-промежуточный закон; 2-закон постепенного закупоривания пор; 3-закон полного закупоривания пор; 4-закон с образованием осадка).

В системах смазки для очистки масла от загрязняющих примесей используются фильтрующие элементы, средний размер ячеек (пор) которых больше среднего размера твердых частиц загрязнений. По мере загрязнения фильтра в процессе эксплуатации двигателя, как было отмечено ранее, соотношение размеров фильтрующих ячеек (пор) и загрязняющих примесей будет меняться. Следовательно, будет изменяться и закон фильтрации, описывающий динамику изменения гидравлических параметров фильтра. В связи с этим, в начальный момент времени фильтр осаждаёт эти частицы на внутренних стенках пор и поэтому работает с

низкой производительностью  $W_{\phi min}$ . Со временем, гидравлическое сопротивление фильтра растет, увеличивается тонкость очистки, а, следовательно, существенно улучшается качество очистки масла за счет увеличения производительности фильтра по отбору загрязняющих примесей из масла  $W_{\phi cp}$ . По мере формирования осадка с одинаковой пористостью по высоте, процесс фильтрования будет происходить аналогично течению жидкости сквозь изотропную пористую среду с неизменными свойствами. В этот период производительность фильтра достигает своего максимума  $W_{\phi max}$ . Именно на этот период времени эксплуатации для рассматриваемых типов фильтров, когда гидравлическое сопротивление фильтрующих элементов достигает величины  $R_{\phi max}$  соответствующей их максимальной производительности  $W_{\phi max}$  (рисунок 4), приходится наибольшая эффективность их работы. Этот период характеризуется тем, что фильтр начинает работать по закону фильтрования с образованием осадка.

На рисунке 4 представлены полученные экспериментальным путем графики изменения средней производительности фильтров  $W_{\phi cp}$  за определенный период эксплуатации, соответствующий определенной степени загрязнения фильтра, выраженной через его гидравлическое сопротивление  $R_{\phi}$ , с фильтроэлементами, имеющими различную тонкость очистки. По мере дальнейшего увеличения толщины слоя загрязнений, существенного уменьшения средней величины размеров пор, происходит образование кристаллов солей кальция и "цементация" слоя загрязнений и этот процесс сопровождается резким увеличением активной составляющей гидравлического сопротивления  $R_{\phi}$ , а также уменьшением производительности фильтра  $W_{\phi}$  [1, 3].

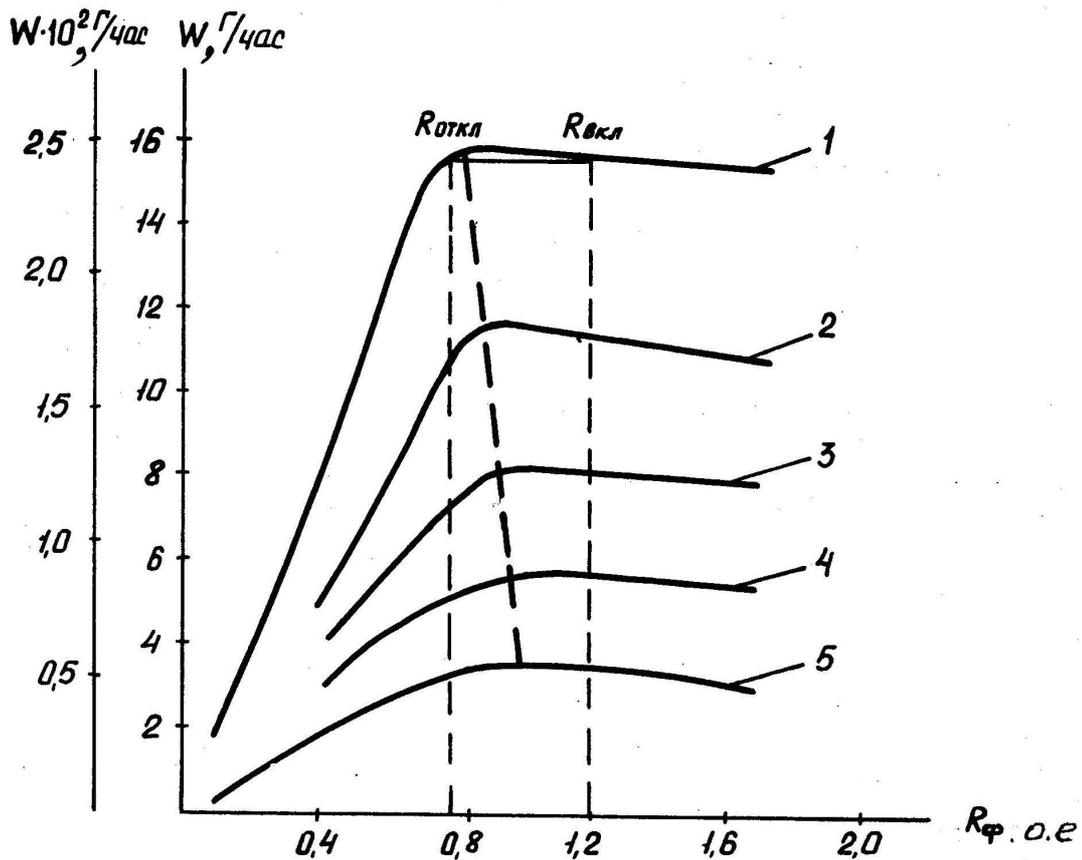


Рисунок 4 - Кривые изменения производительности фильтра  $W_\phi$  в зависимости от степени загрязнения ( $R_\phi$ ) и тонкости очистки (начального гидравлического сопротивления) фильтра (1, 2, 3, 4, 5 – кривые изменения производительности фильтра при сопротивлении фильтрующей перегородки соответственно  $R_\phi = 1,0; 0,8; 0,6; 0,4; 0,2$  о.е.).

Увеличение гидравлического сопротивления фильтра и снижение производительности его работы связано в этот период со снижением его пропускной способности. Поскольку это влияет на гидравлические параметры масляной магистрали, а, следовательно, на режимы трения, именно при достижении гидравлического сопротивления фильтра, соответствующего началу снижения максимальной производительности  $W_{\phi max}$  по очистке масла от примесей до величины  $0,99W_{\phi max}$  ( $R_{вкл}$  на рисунке 4) необходимо проводить техническое обслуживание фильтра, т.е. менять или промывать его фильтрующие элементы. С этой

целью разработаны и предлагается следующий порядок и методика определения искомых величин [1]:

1. Необходимо экспериментально определить и построить графические зависимости характеристик процесса загрязнения и изменения концентрации примесей в моторном масле  $X \% = f(t)$ , производительности (скорости) фильтрования масла фильтром  $W_\phi = f(t)$  и изменения инерционной и активной составляющих гидравлического сопротивления фильтра  $Z_\phi(t_{u\phi}, R_\phi) = f(t)$  от времени работы, как это показано на рисунке 5.

2. Определить начало периода работы фильтра по закону фильтрования *с образованием осадка*.

Его можно найти различными способами:

– по кривой изменения концентрации примесей, взяв за точку отсчета момент уменьшения величины концентрации  $X\%$  (рисунки 1, 5);

– по уравнениям (2), выведенным для различных законов фильтрования при известных режимах работы ( $Dp=const$  или  $W=const$ ), путем подстановки экспериментальных значений в эти уравнения и используемые координаты графиков.

3. Определить максимальную производительность фильтра  $W_{\phi max}$  либо по экспериментальным зависимостям по кривой накопления примесей  $X \% = f(t)$  – минимум на интересующем нас участке (рисунки 1, 5); либо путем нахождения максимума на кривой, построенной в координатах  $\frac{1}{W_\phi}$  – средняя производительность фильтра – время работы фильтра (рисунок 5); либо в координатах: средняя производительность фильтра ( $W_{cp.\phi}$ ) – гидравлическое сопротивление ( $R_\phi$ ), пропорциональное степени загрязнения фильтра и соответствующее продолжительности его работы  $t, час$  (рисунок 4).

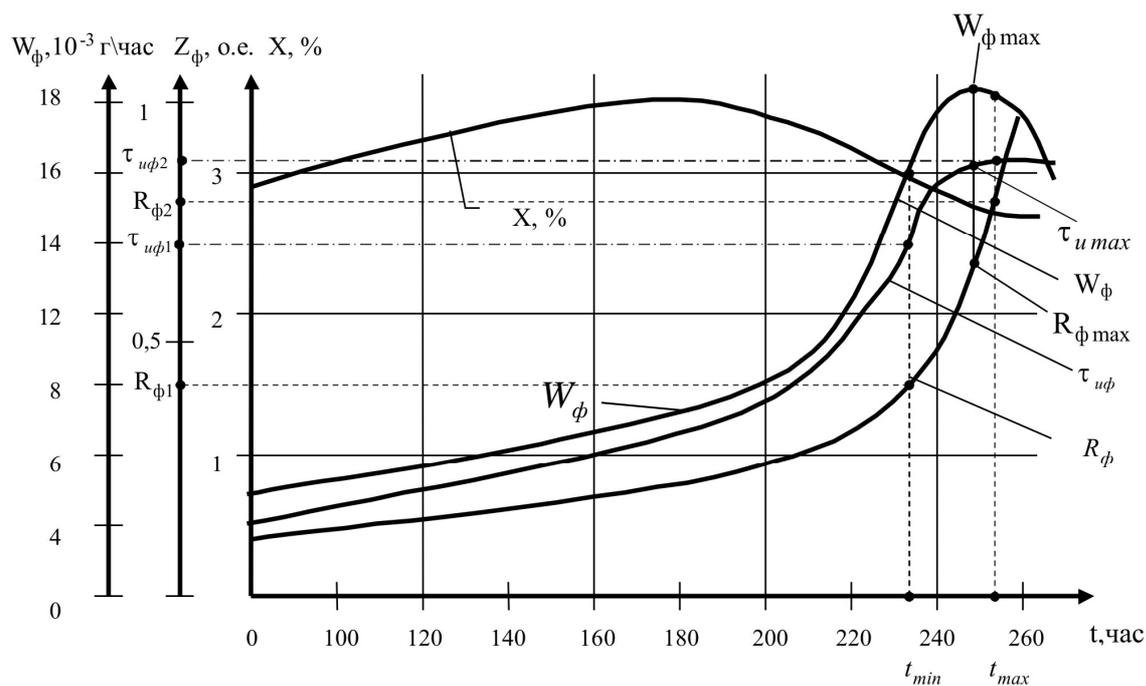


Рисунок 5 – Изменение характеристик фильтра от длительности эксплуатации.

4. Определить величины составляющих гидравлического сопротивления его фильтрующих элементов, соответствующих началу снижения максимальной производительности фильтра  $W_{\phi max}$ , до величины  $0,99 W_{\phi max}$ , как это показано на рисунке 4 ( $R_{вкл}$ ) и на рисунке 5 ( $t_{uf}$  и  $R_{\phi}$ ).

Таким образом, разработанная методика позволяет экспериментальным и аналитическим путем определить величину максимальной производительности любого типа фильтра  $W_{\phi max}$ , и последующего его снижения ее до величины  $0,99 W_{\phi max}$ , найти соответствующие ей величины составляющих гидравлического сопротивления фильтра ( $t_{uf}$  и  $R_{\phi}$ ), рассчитать период работы фильтра  $t$ , необходимый для ее достижения. Рассчитанный период и будет периодом времени, определяющим необходимость проведения технического обслуживания по замене фильтра и масла по его фактическому техническому состоянию

Предлагаемая методика позволяет определять периодичность обслуживания при любом дисперсном и качественном составе загрязняющих примесей и тонкости очистки фильтра, соответствующим определенному закону фильтрования масла фильтром. При возникновении неисправности, когда фильтр работает либо по закону полного закупоривания пор, либо по закону с образованием осадка, производительность работы фильтра  $W_{cp.\phi}$  возрастает, при этом время, определяющее периодичность обслуживания, уменьшается. Кроме того, сопоставляя соответствие гидравлического сопротивления фильтра  $R_\phi$  с величиной производительности его работы  $W_{cp.\phi}$  в любой фиксированный момент времени, можно определить закон фильтрования и найти остаточный ресурс работы фильтра.

В свою очередь, при нормальном безаварийном функционировании двигателя, эффективностью очистки и временем периодичности обслуживания можно управлять, изменяя тонкость очистки фильтра. Например, уменьшая тонкость очистки фильтров  $\delta$  можно увеличить величину его максимальной производительности  $W_{\phi max}$ . При этом время работы такого фильтра в оптимальном режиме уменьшается.

#### **Литература:**

1. Технические возможности повышения ресурса автономных электростанций энергетических систем: Монография / Атрощенко В.А. и др. Краснодар: Издательский Дом-Юг, 2010. – 192 с.
2. Григорьев М.А. Очистка масел двигателей внутреннего сгорания. М.: Машиностроение, 1983. – 148 с.
3. Жужиков В.А. Фильтрование: Теория и практика разделения суспензий. М.: Химия, 1980. – 400 с.

#### **References:**

1. Tehnicheskie vozmozhnosti povyshenija resursa avtonomnyh jelektrostantsij jenergeticheskikh sistem: Monografija / Atroschenko V.A. i dr. Krasnodar: Izdatel'skij Dom-Jug, 2010. – 192 s.
2. Grigor'ev M.A. Ochistka masel dvigatelej vnutrennego sgoranija. M.: Mashinostroenie, 1983. – 148 s.
3. Zhuzhikov V.A. Fil'trovanie: Teorija i praktika razdelenija suspenzij. M.: Himija, 1980. – 400 s.