

УДК 621.43 + 629.113

А.В. Гогайзель, канд. техн. наук

## ДИАГНОСТИКА УСТОЙЧИВОСТИ РАБОТОСПОСОБНЫХ СОСТОЯНИЙ СМАЗЫВАЮЩЕЙ СРЕДЫ ДВИГАТЕЛЯ

Исследование механизма действия присадок на устойчивость работоспособного состояния смазывающей среды автомобильных агрегатов в экстремальных условиях использования является актуальной, но исключительно сложной задачей. Необходимость ее решения, как никогда, стимулируется привлекательностью создания и практического использования на работающем двигателе системы, измеряющей степень старения моторного масла, что позволит по результатам замеров осуществлять его смену в наиболее рациональные сроки. Однако непрерывное совершенствование бортовых средств диагностики настоятельно требует разработки принципиально новых систем управления – кибернетических, реализующих модельные принципы обеспечения работоспособности смазывающей среды двигателя. Следует подчеркнуть, что практическая эффективность существующих бортовых систем контроля пока низка из-за отсутствия возможности распознавания ранних стадий развития и оперативного предупреждения аварийного повреждения основных деталей дорогостоящих агрегатов. Анализ выполненных исследований подтвердил отсутствие модели, позволяющей вычислять, прогнозировать и управлять устойчивостью работоспособных состояний смазочной среды двигателя в эксплуатации.

Моделирование процессов, протекающих при работе масла в механизмах двигателя, ведется в двух направлениях:

– моделирование химических реакций между присадками и продуктами превращения смазки, а также присадкой и трущимися поверхностями деталей с целью изучения механизма действия ее антиокислительных и противоизносных свойств;

– создание специальных приборов и устройств, в которых моделируются условия работы реальных двигателей и их механизмов для изучения действия моющих и противоизносных присадок.

В работах нового, быстро развивающегося направления, изучается связь между структурой, физико-химическими свойствами и эффективностью действия присадок для поддержания и сохранения устойчивости работоспособного состояния смазывающей среды двигателя. Это должно позволить увеличить сроки смены масла до 30 тыс. км без наступления катастрофического изнашивания кулачков, деталей цилиндро-поршневой группы и кривошипно-шатунного механизма. Уже накоплен определенный опыт изучения механизмов действия различного типа присадок, имеются значительные результаты в этой области, позволяющие в той или иной степени

прогнозировать направленный синтез эффективных присадок. Трудность задачи сохранения устойчивости работоспособных состояний смазывающей среды, как открытой системы, заключается в том, что такие состояния далеки от термодинамического равновесия.

В соответствии с концепцией Гленсдорфа-Пригожина [1] это явление в классической термодинамике трактуется как процесс разрушения и возникновения структур, трансформирующихся во времени через переходное состояние – точку бифуркации [2]. В рамках термодинамического представления свойствами структурной приспособляемости помимо металла обладает масло: в нем образуются вторичные структуры, проявляющие повышенную антифрикционную и противоизносную способность. Этот эффект в значительной степени усиливается в присутствии ПАВ, представляющих собой соединения различного состава и строения.

Эти соединения активно влияют на процесс формирования “третьего тела”, приводя к разупорядочению его структуры. При смазывании контактирующих тел диспергированными маслами образуются полимолекулярные поверхностные слои, которые термодинамически недостаточно устойчивы. Диспергированные в масле твердые частицы способствуют появлению дефектов в кристаллической структуре металла, что приводит к снижению коэффициента трения и износу контактирующих поверхностей.

Систематизация данных об изнашивании в присутствии химически активной смазочной среды на основе термодинамических представлений позволяет перейти к диагностическим исследованиям процесса поведения смазывающей среды для прогнозирования устойчивости работоспособных состояний. В среде протекают процессы двух типов: разрушение структуры при состоянии, близком к равновесному; возникновение структуры при состоянии системы, далеком от такового. Наряду с этим различают: равновесные структуры – как следствие конкуренции между беспорядком и организацией; диссипативные структуры, возникающие в результате обмена энергией и веществом с окружающей средой – как новое состояние вещества, далекое от равновесного. В свою очередь, диссипацию можно рассматривать как сверхкритическое состояние системы. Будем различать пассивные и активные диссипативные структуры. Первые, появляющиеся в условиях энтропии роста, характерны для систем, взаимосвязанных с окружающей средой, например, в паре

трения; вторые – для систем, содержащих источник внутренней накачки, например в двигателях. Необходимым условием нормализации трения и поверхностного разрушения считается такое динамическое равновесие процессов активирования и пассивации, при котором эффективная энергия активирования находится в пределах значений энергии, необходимой для образования вторичных структур. При этом условии реализуется принцип самоорганизации, что позволяет рассматривать энтропийно-энергетическую модель процессов структурной приспособляемости и устойчивости работоспособного состояния смазывающей среды как алгоритм математического описания процесса аппаратом теории катастроф [2]. Предметом изучения теории катастроф является определение качественных изменений в системе уравнений, описывающих объект исследования при изменении его параметров. Такой подход позволяет с единых методологических позиций рассматривать все процессы в двигателе и открывает новые перспективы использования достижений неравновесной термодинамики для диагностирования ранних стадий развития опасных повреждений деталей. При этом описание объекта исследования дается в виде системы дифференциальных или интегродифференциальных уравнений. Компьютерным моделированием устанавливаются особые точки функций, описывающие поведение системы. Под особыми точками понимаются точки функций, в которых наступает потеря структурной устойчивости (например, работоспособного состояния) или определяются особенности отображений этих функций, называемые “катастрофами”.

С целью моделирования процесса поведения смазывающей среды и исследования причин изменения ее работоспособности можно представить в виде единой динамической системы всю совокупность внешних и внутренних воздействий в ней уравнениями

$$F_i \left( \Psi_j; C_\alpha; t; \frac{d\Psi_j}{dt}; \frac{d^2\Psi_j}{dt^2}; \dots; x_i; \frac{\partial\Psi_j}{\partial x_i}; \frac{\partial^2\Psi_j}{\partial x_i \partial x_m}; \dots; f(dx) \right) = 0$$

$$1 \leq i \leq n; \quad 1 \leq \alpha \leq k; \quad m \leq N, \quad (1)$$

где  $x_i, t$ , - соответственно пространственные и временные координаты;  $C_\alpha$  - структурные константы, называемые управляющими, которые могут качественно влиять на свойства решений  $\Psi_1(t, x, C_\alpha), \Psi_2(t, x, C_\alpha)$ , описывающих переменные состояния динамической системы.

Введением определенных допущений сложные динамические системы можно свести к более простым автономным, для которых уравнение (1) не содержит пространственных производных, не зависит от пространственных координат и может быть

представлено функцией  $F_i = \frac{\partial\Psi_j}{dt} - f_i(\Psi_j; C_\alpha) = 0$ ,

где  $f_i$  полностью не зависят от времени.

В других случаях системы (1) сводятся к градиентным системам, для которых  $f_i$  могут быть заданы антиградиентом по отношению к  $\Psi_j$  некоторой потенциальной функции  $U$  :

$$f_i = \frac{\partial V(\Psi_j; C_\alpha)}{\partial \Psi_j} \quad (2)$$

Изложенное позволяет представлять качественные состояния любой системы как и смазывающей среды двигателя в виде семи элементарных катастроф (складки, сборки, ласточкина хвоста, бабочки, гиперболической, эллиптической и параболической отбилики), для каждой из которых в [2] приведены условия возникновения.

Для нахождения уравнений, описывающих сложный процесс деградации работоспособности смазывающей среды, целесообразнее использовать термодинамические эволюционные модели. При таком подходе снижение или потеря работоспособности смазывающей среды может трактоваться как потеря термодинамического равновесия системы. Общая энергия такой системы  $W_0 = W_k + W_n$  определяется суммой кинетической  $W_k$  и потенциальной  $W_n$  энергий:

$W_k = \frac{1}{2} \cdot M_{ij} \cdot \dot{x}_i \cdot \dot{x}_j$  - квадратичная форма от обобщенных скоростей  $\dot{x}_i$ ;

$W_n = V(x, C)$  - потенциальная функция от переменных  $x$  состояния  $C$  и управляющих параметров.

Для статистической консервативной системы  $W_k = 0; W_n = V(x, C)$  условия равновесия, устойчивости и ее потери запишутся соответственно:  $\Delta V = 0; V_{ij} \approx M_k^n, k = 0, \det V_{ij} = 0$ . Поэтому теория катастроф позволяет всесторонне описать характер изменения работоспособного состояния смазывающей среды двигателя.

Модель процесса изменения состояния смазывающей среды двигателя [3] отражает основную схему взаимодействий в системе конкурентных взаимодействий присадок с продуктами износа.

Примем массу продуктов износа  $M_{II}$  в качестве основной переменной, характеризующей состояние смазывающей среды в процессе снижения ее работоспособности.  $M_{II}$  зависит от наработки и конкретных характеристик условий работы двигателя, прежде всего от поступления присадок в масло и от степени развития в нем механизма избирательного переноса. Из двух основных видов присадочных веществ – соединений щелочи и йода лимитирует развитие изнашивания лишь один (согласно принципу Либиха): если в масле, например, отношение концентрации общей щелочи к концентрации общего йода 10:1 или выше, то лимитирующим элементом

является йод (для силовых агрегатов характерен этот случай). Поэтому в модели под присадочными веществами понимаются соединения йода. Запас присадок  $\Pi$  в масле:

$$\Pi = \Pi_w + \Pi_m + \Pi_p, \quad (3)$$

где  $\Pi_w$  – общее количество присадок в масле,  $\Pi_m$  – в доливках масла,  $\Pi_p$  – в фильтре-дозаторе. Предельно упрощая круговорот присадочных веществ в смазывающей среде двигателя, рассматриваем его лишь как обмен между блоками  $\Pi_w, \Pi_m, \Pi_p$ . Запас присадок в масле меняется со значительно меньшей скоростью, чем масса продуктов износа  $M_{II}$ ; естественно считать его медленной переменной.

Скорость прироста массы присадок предполагается пропорциональной количеству присадочных веществ в масле, а расходование – пропорциональным  $M_{II}^2$  [5]. Уравнение динамики процесса изменения работоспособности масла имеет вид

$$\frac{dM_{II}}{dt} = \max \{ c\Pi_w M_{II} - \gamma M_{II}^2, -\gamma M_{II}^2 \}, \quad (4)$$

где  $c, \gamma$  – некоторые постоянные. Имеем из (2):  $\Pi_w = \Pi + \Pi_m + \Pi_p$ ;  $\Pi_p = c_p \cdot \Pi$ , где постоянная  $c_p$  – это концентрация йода в фильтр-дозаторе;  $\Pi_m = c_{max} \cdot V(\Pi) \cdot M$ , где  $M$  – масса присадочных веществ,  $c_{max}$  – максимальная концентрация йода в них, а непрерывная функция запаса присадок  $V(\Pi)$  описывает насыщение их йодом.  $V(\Pi)$  выбирается так, что  $\Pi_m \leq \Pi$ ,  $V(0) = 0$ ,  $V(\Pi) \rightarrow 1$  при  $\Pi \rightarrow \infty$ ;

$$\frac{dV}{d\Pi} \geq 0; \quad \frac{d^2V}{d\Pi^2} \leq 0 \text{ при всех } \Pi \geq 0. \quad M \text{ запишем в виде}$$

$M = mS_m$ , где  $m$  – это плотность массы погруженных в масло присадок ( $г/м^2$ ), а  $S_m$  – площадь распространения их. Последняя, естественно, зависит от чистоты масла  $S_m = SW(M_{II})$ , где  $S$  – предельно возможная в данном двигателе площадь распространения присадок (определяется геометрией деталей и характеристиками системы смазки). Функция  $W(M_{II})$  описывает изменение занимаемой присадками площади в результате развития процесса избирательного переноса и соответствующего изменения чистоты масла. Для этой функции предполагается, что  $W(0) = 1$ ,  $W(M_{II}) \rightarrow 0$  при  $\Pi \rightarrow \infty$ ;

$$\frac{dW}{dM_{II}} < 0, \quad \frac{d^2W}{dM_{II}^2} > 0$$

для всех  $M_{II} \geq 0$ . С учетом выписанных соотношений уравнение динамики изнашивания (4) принимает вид:

$$\frac{dM_{II}}{dt} = \max \{ cM_{II} (\Pi - c_f \Pi - c_m S V W(M_{II})), -\gamma M_{II}^2 \}, \quad (5)$$

где  $c_m = mc_{max}$ ,  $c_f = c_p + \gamma/c$ . Это уравнение учитывает как преимущество присадок в конкурентной борьбе с изнашиванием за присадочные вещества, так и подавление продуктами износа их действия.

По отношению к предельной площади распространения присадок  $S$  масса продуктов износа  $M_{II}$  – также быстрая переменная. Поэтому можно считать, что  $M_{II}$  всегда находится в некотором состоянии равновесия  $M_0(\Pi, S)$ , зависящем от конкретных значений параметров  $\Pi$  и  $S$ . Состояние равновесия  $M_0(\Pi, S)$  является решением уравнения  $\frac{dM_{II}}{dt} = 0$ ; в трехмерном пространстве с осями  $\Pi, S, M_{II}$  это уравнение задает некоторую поверхность точек равновесия  $\Gamma$  (рис.1). Пусть теперь  $\Pi$  и  $S$  медленно изменяется. В этом случае точка  $M_0$ , характеризующая состояние смазывающей среды двигателя, перемещается по поверхности  $\Gamma$ . Физический смысл имеет часть этой поверхности, расположенная в области  $\Pi \geq 0, S \geq 0, M_{II} \geq 0$  [4].

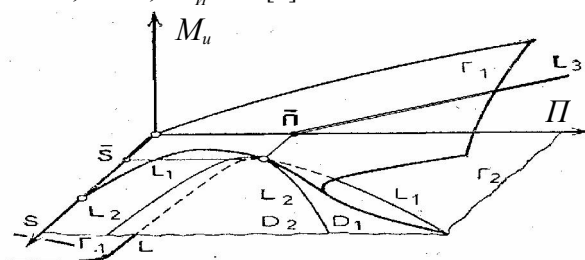


Рис.1. Поверхность точек равновесия  $\Gamma = \Gamma_1 \cup \Gamma_2$  работоспособных состояний системы

Из определяющего  $\Gamma$  уравнения

$$F(\Pi, S, M_{II}) = cM_{II} (\Pi - c_f M_{II} - c_m S V W) = 0$$

видно, что  $\Gamma$  состоит из двух компонент:  $\Gamma = \Gamma_1 \cup \Gamma_2$ , где  $\Gamma_1$  – поверхность, задаваемая в пространстве  $(\Pi, S, M_{II})$  соотношением:

$$f(\Pi, S, M_{II}) = \Pi - c_f M_{II} - c_m S V W = 0, \quad (6)$$

а  $\Gamma_2$  – это плоскость  $M_{II} = 0$  (любые  $\Pi$  и  $S$ ). Уравнение линии пересечения  $L_1$  поверхностей  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$  находится из (4), в котором положено  $M_{II} = 0$ :

$$S = \frac{\Pi}{c_m V}. \quad (7)$$

Можно доказать, что в рассматриваемом случае плоскость  $M_{II} = 0$  разделяется на две области  $D_1$  и  $D_2$ : над каждой внутренней точкой области  $D_1$  лежат по две точки поверхности  $\Gamma_1$ , а над внутренними точками области  $D_2$  не лежит ни одной точки поверхности  $\Gamma_1$ . Над каждой точкой граничной линии  $L_2 = D_1 \cap D_2$  лежит по одной точке поверхности  $\Gamma_1$ . Эта поверхность как бы образует двулистную складку над областью  $D_1$  (рис. 1). Уравнение линии  $L_2$  (проекция на  $\Gamma_2$ , лежащей на  $\Gamma_1$  линии складки  $L$ ) получается исключением  $M_{II}$  из системы уравнений:

$$\begin{cases} f(\Pi, S, M_{II}) = 0 \\ \frac{df}{dM_{II}}(\Pi, S, M_{II}) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

где  $f(\Pi, S, M_{II})$ , берется из уравнения (6). Полученное уравнение имеет вид  $S = g(\Pi)$ , где  $g(\Pi)$  – некоторая функция. При этом можно доказать, что  $g(\Pi) \geq \frac{\Pi}{c_m V}$ , т.е., что кривая  $L_1$  лежит в области  $D_1$ . Аналогично уравнение линии  $L_3$  – проекции линии складки  $L$  на плоскость  $S = 0$  получается исключением  $S$  из той же системы (8) и имеет вид:

$$\Pi = c_f \left( M_{II} - W \left/ \frac{dW}{dM_{II}} \right. \right). \quad (9)$$

Из этого уравнения следует, что существует единственная точка пересечения  $(\bar{\Pi}, \bar{S}) = \left( -c_f \left/ \frac{dW}{dM_{II}} \right|_{M_{II}=0}, g(\bar{\Pi}) \right)$  линии складки  $L$  с плоскостью  $G_2$ . Часть линии складки располагается в области  $\Pi < 0$  (рис. 1). Далее мы предполагаем, что функции  $V, W$  выбраны таким образом, что  $\bar{\Pi} > \Pi_{\min}$ , где  $\Pi_{\min}$  точка минимума функции  $S = \frac{\Pi}{c_m V}$ ,  $\Pi \in [0, \infty)$ .

Поверхность  $\Gamma$  содержит как устойчивые, так и не устойчивые состояния равновесия. Исследование устойчивости показывает, что плоскость  $G_2$  разделяется линией  $L_1$  на две области: при  $S > \frac{\Pi}{c_m V}$  точки  $\Gamma_2$  устойчивы, при  $S < \frac{\Pi}{c_m V}$  – неустойчивы. Точки поверхности  $\Gamma_1$  устойчивы при  $\Pi < c_p \left( M_{II} - W \left/ \frac{dW}{dM_{II}} \right. \right)$  (верхний лист складки) и неустойчивы в противном случае. На рис. 2 изображены области устойчивости на  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$ . Стрелками показано направление векторного поля  $\frac{dM_{II}}{dt}$  в различных областях пространства  $(\Pi, S, M_{II})$ . Часть  $H_1 H_2 H_3$  поверхности  $\Gamma_1$ , а также область  $D_3$  в плоскости  $G_2$ , ограниченная линией  $L_1$  и осями  $\Pi$  и  $S$ , состоят из неустойчивых точек.

Рассмотрим поведение гомеостата работоспособного состояния системы при постоянном  $S$  и медленно меняющемся  $\Pi$ . Пусть точка  $G = (\Pi, S, M_{II})$ , отражающая состояние системы, находится на  $\Gamma_2$  в устойчивой ее области,  $G = G_0 = (\Pi_0, S_0, M_0)$ . Пусть  $S_0 > \bar{S}$ . Если  $\Pi$  будет медленно увеличиваться, что соответствует накоплению в смазке продуктов износа, то  $G$  будет двигаться в плоскости  $\Gamma_2$  параллельно оси  $\Pi$ . При этом, как следует из уравнения (7), траектория движения обязательно пересечет в некоторой точке  $G_1$  линию  $L_1$  (при значении  $\Pi = \Pi_1$ ) и, выйдя из области устойчивости, попадет в область  $D_3$ . Поскольку реальная система не может оставаться в состоянии неустойчивого равновесия, то точка  $G$

быстро по сравнению с изменением  $\Pi$  перейдет в новое устойчивое состояние равновесия  $G_2$ , находящееся на верхнем листке складки  $\Gamma_1$  (“вспышка” массы продуктов износа из-за низкой активности избирательного переноса их). Существование точки  $G_2$  вытекает из того, что  $D_3 \subset D_1$ . Если  $(\tilde{\Pi}, \tilde{S}) \in D_3$ , то  $c_m \tilde{S} V(\tilde{\Pi}) < \tilde{\Pi}$ , т.е.  $c_m \tilde{S} V(\tilde{\Pi}) = \varepsilon \tilde{\Pi}$  для некоторого  $\varepsilon \in (0, 1)$ . Для непрерывной функции

$$\begin{aligned} \varphi(M_{II}) &= \Pi - c_f M_{II} - c_m \tilde{S} V(\tilde{\Pi}) W(M_{II}) = \\ &= \tilde{\Pi} (1 - \varepsilon W(M_{II})) - c_f M_{II} \end{aligned}$$

имеем  $\varphi(0) = \Pi(1 - \varepsilon) > 0$ ,  $\varphi(M_{II}) < 0$  при достаточно больших  $M_{II}$ , следовательно, существует  $\tilde{M}_{II} > 0$  такое, что  $\varphi(\tilde{M}_{II}) = 0$ . Последнее равенство означает, что  $(\tilde{\Pi}, \tilde{S}, M_{II}) \in \Gamma_1$ , т.е.  $(\tilde{\Pi}, \tilde{S}) \in D_1$ . Движение точки  $G$  по верхнему листу складки соответствует значительной массе продуктов износа и невысокой активности противоизносного процесса, т.е. неисправным состояниям системы (работоспособность смазывающей среды непрерывно снижается). Если теперь начать уменьшать запас присадок  $\Pi$  (т.е. не пополнять их поступление в масло), то  $G$  будет двигаться по верхнему листу  $\Gamma_1$ , пока не дойдет до линии складки  $L$  в некоторой точке  $G_3$ , после чего скачком переместится в новое устойчивое состояние равновесия  $G_4$ , лежащее на плоскости  $\Gamma_2$ . Этот переход системы из неисправного состояния в неработоспособное происходит при значении  $\Pi = \Pi_3$ . Поскольку  $\Pi_3 \neq \Pi_1$  (что следует из включения  $D_3 \subset D_1$ ), возникает петля гистерезиса  $G_1 G_2 G_3 G_4$  (рис. 2).

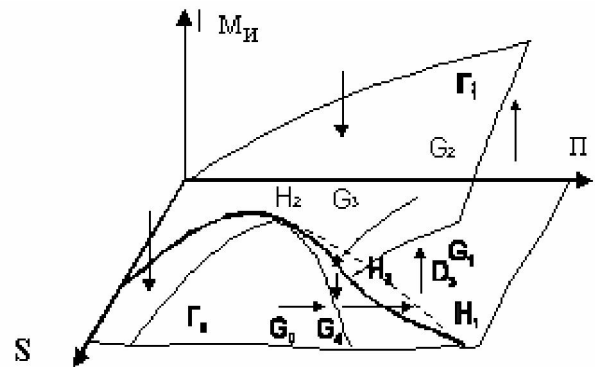


Рис. 2. Области устойчивости на поверхности  $\Gamma$

Рассмотрим правдоподобные и практически важные зависимости:

$$V(\Pi) = \frac{\Pi}{\Pi + \xi}, \quad W(M_{II}) = e^{-\alpha M_{II}}, \quad (10)$$

где  $\alpha, \xi$  – постоянные. Уравнения для  $L_1, L_2, L_3$  принимают следующий вид:

$$S = \frac{1}{c_m} (\Pi + \xi), \quad (11)$$

$$S = \frac{c_f}{\alpha c_m} \left( 1 + \frac{\xi}{\Pi} \right) \cdot e^{\frac{\alpha}{c_f} \Pi^{-1}}, \quad (12)$$

$$\Pi = c_f \left( M_{II} + \frac{1}{\alpha} \right). \quad (13)$$

Координаты общей точки  $L_1$  и  $L_2$ ;  
 $(\bar{\Pi}, \bar{S}) = \left( \frac{c_f}{\alpha}, \frac{\alpha + c_f}{\alpha \cdot c_m} \right)$ . Критический запас присадок

$\Pi_1$ , при котором происходит скачок массы продуктов износа, в этом случае линейно зависит от  $S$ :

$$\Pi_1 = c_m S - \xi, \quad (14)$$

поэтому  $S$  представляет собой величину, определяющую устойчивость смазывающей среды двигателя нагрузкам. Величина скачка  $M_{II}$  при переходе в неработоспособное состояние определяется из формулы (6) с учетом (10), (11). Величина  $\Pi_3$ , при которой среда выходит из неработоспособного состояния, определяется из (12). Таким образом, соотношения (10) - (14) могут быть использованы для прогноза состояния смазывающей среды двигателя при изменении нагрузки на агрегат в ту или иную сторону.

Аналогично и в общем случае  $S$  характеризует “предел устойчивости” работоспособного состояния смазывающей среды к эксплуатационным нагрузкам (для прогноза используются уравнения (7) – (9)). Отсюда вытекает возможность применения модели для целей мониторинга взаимодействия силовых агрегатов с окружающей средой. Определив максимально допустимую нагрузку на систему из уравнения (5), можно судить о степени близости системы к критическому состоянию (“вспышке” массы продуктов износа). Тем самым, в модели подтверждается достаточность наблюдения для этих целей за переменной  $\Pi$  [5].

Использование предлагаемой модели в целях мониторинга предопределяет ее дальнейшую конкретизацию и верификацию. Работа с моделью требует определения, подбора для данного масла зависимостей  $V(\Pi)$  и  $W(M_{II})$ ; в соотношениях (10) это сводится к определению констант  $\alpha$  и  $\xi$ . Кроме того необходимо определить для заданной марки масла и конкретной модели двигателя  $\Pi$  и  $S$ .

Предлагаемая модель раскрывает характер действия механизма устойчивости работоспособности смазывающей среды двигателя и позволяет практически реализовать гомеостатические принципы управления. Поддержание потенциала работоспособности среды обеспечивается путем стабилизации физико-химических свойств моторного масла и восстановления потерь от износа, а также их предотвращения за счет образования защитных пленок на сопряженных деталях двигателя. С этой целью разработан фильтр-дозированный пакет, создающий постоянно действующий трибохимический режим в

смазочной системе. Фильтр-дозированный пакет содержит щелочной реагент, фильтр-дозатор йода и наполнитель (алюминий)[5].

При работе двигателя циркулирующее в системе масло после очистки поступает в контактную камеру и взаимодействует со щелочным реагентом и наполнителем. Образовавшиеся мелкодисперсные частицы на основе олова и частично гидрооксида алюминия и алюмината натрия вместе с маслом через дополнительный фильтрующий элемент поступают в фильтр-дозатор йода. Взаимодействуя с йодом, частицы переходят в молекулярное состояние и преобразуют свойства модификаторов трения. На трущихся поверхностях они образуют защитные антифрикционные металлоорганические пленки, восстанавливая потери от износа. Металлические мелкодисперсные продукты износа также попадают с маслом в фильтр-дозатор йода, вступают с ним в химическое взаимодействие, приобретая свойства модификаторов трения и восстанавливая износ пар трения. Углеродистые отложения, поступающие в масло из камеры сгорания двигателя, диспергируются щелочным реагентом, активизируются йодом и образуют с маслом стойкий коллоид, что улучшает смазочные свойства масла. Часть йода, постоянно растворяясь в масле, предварительно обработанном щелочным реагентом, оказывает ингибирующее действие на процесс окисления масла.

### Выводы

С помощью модели практически реализуется управление с использованием гомеостатических принципов (самоорганизация и саморегуляция устойчивости), а в перспективе становится реальным создание бортовых систем прогнозирования и обеспечения работоспособного состояния смазывающей среды двигателя.

### Список литературы:

1. Гленсдорф П., Пригожин И. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций. - М., Мир, 1973.-280с.
2. Томпсон Дис М.Т. Неустойчивости и катастрофы в науке и технике: - М., Мир, 1985.-254с.
3. Гогайзель А.В. Математическая модель снижения и потери работоспособности системы смазки двигателя / Вестник ХНАДУ. - Харьков: РИО ХНАДУ, 2001, Вып. 15-16. -с. 43-45
4. Гогайзель А.В. Информационно-энергетические модели управления работоспособностью автотранспортных средств / Автомобильный транспорт. Сб. науч. трудов.-Харьков: Изд. ХНАДУ, 2001, вып. 7-8. -с. 163-165.
5. Гогайзель А.В., Кравченко А.П. Оперативное управление работоспособностью автотранспортных средств / Научное пособие. - Луганск: Изд. СХУ, 2000.-128с.