

УДК 621.431

О.К. Безюков, д-р техн. наук, В.А. Жуков, канд. техн. наук, О.В. Жукова, канд. техн. наук

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ СТАРЕНИЯ ОХЛАЖДАЮЩИХ ЖИДКОСТЕЙ ДВС

Введение

Транспортные двигатели различного назначения (автомобильные, судовые, тепловозные) в подавляющем большинстве имеют замкнутые жидкостные системы охлаждения. Производители двигателей предъявляют к охлаждающей жидкости ряд требований: жидкость должна быть химически неагрессивной, не иметь склонности к накипеобразованию, расслоению, шламообразованию. Анализ отраслевых требований и рекомендаций заводов-изготовителей

ДВС позволил определить показатели качества охлаждающей жидкости (ОЖ) и их рекомендуемые значения (таблица 1). Требуемые параметры теплоносителя могут быть обеспечены различными методами водоподготовки, большинство из которых не целесообразно или невозможно использовать из-за ограниченности подкапотного пространства, машинного отсека или отделения, необходимости установки дополнительного оборудования и усложнения систем охлаждения.

Таблица 1. Требования, предъявляемые к охлаждающим жидкостям судовых ДВС

Требования, предъявляемые к охлаждающей жидкости	Показатели качества охлаждающей жидкости	Предельно допустимые значения
Малая химическая агрессивность	содержание сульфат-ионов (SO_4^{2-})	не более 100 мг-экв/дм ³
	содержание хлорид-ионов (Cl^-)	не более 200 мг-экв/дм ³
	содержание растворенного кислорода	—
	щелочность	—
	водородный показатель	8,5 – 9,0
Отсутствие склонности к накипеобразованию	удельная электропроводность	—
	общее солесодержание	не более 250 мг/дм ³
Отсутствие склонности к расслоению	жесткость	1,5–3,0 мг-экв/дм ³
Отсутствие вспениваемости	—	—
Способность влиять на процессы теплообмена	поверхностное натяжение	0,055 Н·м
	кинематическая вязкость	$1,20 (\text{м}^2/\text{с}) \cdot 10^{-6}$

Наиболее приемлемым и эффективным способом обеспечения требуемых эксплуатационных свойств охлаждающей жидкости является ведение присадок. Наиболее перспективными и эффективными являются комплексные многофункциональные присадки, в состав которых входят ингибиторы коррозии, поверхностно-активные вещества (ПАВ) и водо-растворимые полимеры. Наиболее распространенный ингибитор коррозии, применяемый в присадках, – силикат натрия.

Формулирование проблемы

Под действием эксплуатационных факторов происходит деструкция компонентов присадки и снижение качества охлаждающей жидкости, в связи с чем, возникает необходимость ее замены или восстановления требуемых свойств. Восстановление свойств может быть осуществлено путем дополни-

тельного введения присадок. В настоящее время отсутствуют обоснованные рекомендации по продолжительности эксплуатации охлаждающих жидкостей, содержащих присадки, и периодичности дополнительного введения в них присадок для восстановления качества теплоносителя. Такие рекомендации позволили бы, во-первых, повысить надежность систем охлаждения и двигателей в целом и, во-вторых, сократили бы эксплуатационные расходы, связанные с необоснованно ранней или поздней заменой охлаждающих жидкостей.

Для выработки рекомендаций необходимо решить следующие задачи:

- установить браковочные показатели охлаждающих жидкостей и факторы, влияющие на их изменение;

- выяснить механизм старения охлаждающих жидкостей;

- дать математическое описание процессов старения, как функцию времени и основных режимных параметров системы охлаждения;

- обоснованно назначить предельные значения браковочных показателей охлаждающих жидкостей.

Решению первой задачи посвящена работа [1].

В качестве гипотезы причин старения присадок была принята термофлуктуационная теория разрушений, предложенная академиком Журковым С.Н., и развитая научной школой, сформированной им в физико-техническом институте имени академика

Иоффе, в соответствии с которой разрушение внутренних связей происходит в результате двух основных воздействий – теплового и механического [2, 3].

С физической точки зрения следствием термомеханического воздействия, возникающего при прокачивании жидкости по системе охлаждения, является растяжение межатомных связей в молекулах веществ, входящих в раствор, межмолекулярных связей в макромолекулах полимеров и связей, удерживающих ПАВ в мицеллярных образованиях, рис. 1. Конечным результатом такого растяжения является разрыв связей. Очевидно, что в первую очередь будут разрушаться наиболее слабые связи.

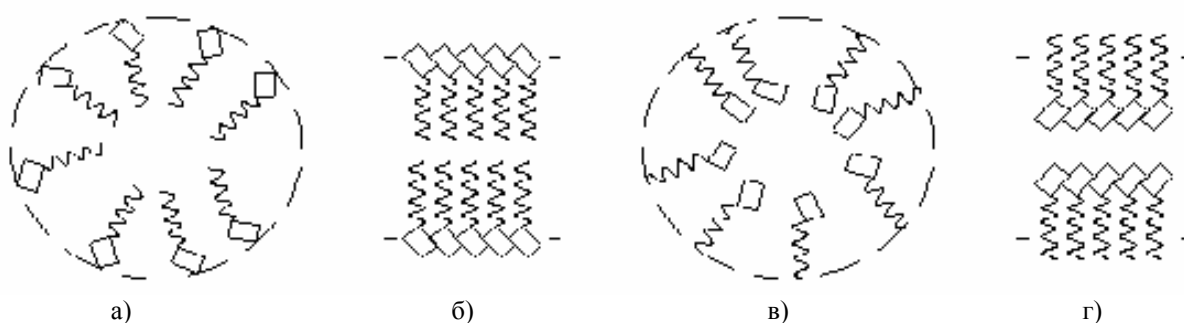


Рис. 1. Мицеллярные структуры молекул ПАВ
а, в – шарообразные мицеллы; б, г – пластинчатые мицеллы

Механическое воздействие на жидкость оказывается в результате ее прокачивания по системе, так как в системах охлаждения преобладает турбулентный режим течения, сопровождающийся интенсивным перемешиванием жидкости с пульсациями скоростей и давлений. Наряду с основным продольным перемещением жидкости наблюдаются поперечные и вращательные движения отдельных объемов жидкости. В течениях образуются многочисленные вихри различных размеров, вследствие чего их гидродинамические и термодинамические характеристики испытывают хаотические флуктуации. Наиболее интенсивно эти процессы протекают в рабочих колесах центробежных насосов, при обтекании вибрирующих поверхностей втулок цилиндров, в полостях сложной формы крышек цилиндров, в трубопроводах, а так же при пузырьковом кипении и кавитации. Поэтому в качестве внешних факторов, воздействующих на охлаждающую жидкость и приводящих к ее старению, вызванному деструкцией, содержащихся в жидкости присадок, были определены основные режимные параметры систем охлаждения ДВС. К таким параметрам отнесены температурный уровень

системы, гидравлическое сопротивление внутреннего контура системы охлаждения, время эксплуатации.

Результаты исследований

В рамках данной работы решается интерполяционная задача, в которой объектом исследований является охлаждающая жидкость судовых ДВС, содержащая многофункциональную присадку, в качестве факторов рассматриваются параметры системы охлаждения: рабочая температура жидкости T , гидравлическое сопротивление системы Δp , время эксплуатации τ и концентрация присадки c . Функциями отклика являются основные эксплуатационные свойства охлаждающей жидкости, такие как поверхностное натяжение σ (характеризующее теплофизические свойства), водородный показатель pH (характеризующий коррозионную агрессивность жидкости) и вязкость ν (характеризующая затраты мощности на прокачивание жидкости). Описанной постановке задачи соответствует схема (рис. 2).



Рис.2. Схема постановки задачи

Предложена система уравнений, представляющая собой общий вид математической модели старения охлаждающей жидкости. Математическая модель представляется в виде системы интерполяционных уравнений функций отклика

$$\begin{cases} \sigma = f_1(T, \Delta p, \tau), \\ pH = f_2(T, \Delta p, \tau), \\ \nu = f_3(T, \Delta p, \tau). \end{cases} \quad (1)$$

В качестве функции отклика выбраны параметры, характеризующие эксплуатационные свойства жидкости.

С целью подтверждения принятой гипотезы были созданы экспериментальные установки для проведения ускоренных испытаний, моделирующих термомеханические воздействия на охлаждающую жидкость в процессе эксплуатации ДВС, проведены лабораторные исследования. Объектами испытаний являлась водопроводная вода, соответствующая требованиям, предъявляемым к охлаждающим жидкостям судовых теплоэнергетических установок, и содержащая присадки в различных концентрациях, рекомендованных разработчиками присадок [3].

Для моделирования теплового воздействия необходимо осуществлять циклическое нагревание жидкости от 20 до 100°C с последующим охлаждением, что воспроизводит запуск двигателя, его прогрев, последующую остановку и охлаждение. Интенсивность нагрева должна быть такой, чтобы время повышения температуры соответствовало времени прогрева двигателя в условиях эксплуатации. При разработке методики исследований учитывалось, что наиболее характерными для современных форсированных двигателей являются процессы теплообмена с пузырьковым кипением на наиболее нагретых поверхностях зарубашечного пространства в недогретой жидкости. Механическое воздействие на жидкости оказывается в процессе их прокачивания по системе охлаждения.

После выбора условий проведения эксперимента была составлена матрица планирования. В ней содержатся все возможные неповторяющиеся комбинации на верхнем и нижнем уровнях. Для трехфакторного эксперимента матрица полного факторного эксперимента содержит девять условий проведения эксперимента. Полный факторный эксперимент позволяет получить наиболее полное и точное описание процесса, но требует проведения максимального для данного количества факторов числа экспериментов.

Результаты лабораторных исследований теплового и механического воздействий на охлаждающую жидкость, содержащую присадку [4,5], проведенных при различных условиях, обрабатывались с использованием пакетов прикладных программ Excel-7, Statistika-5, MathCAD 13.

Расчеты позволили получить систему трехфакторных регрессионных уравнений (2-4), описывающих изменения основных эксплуатационных свойств охлаждающих жидкостей с течением времени под действием тепловых и механических воздействий.

Уравнения регрессии имеют вид:

для коэффициента поверхностного натяжения

$$\sigma = 1,678 - 3,41 \cdot 10^{-4} \times \Delta p - 2,36 \cdot 10^{-4} \tau - 0,0175 \cdot T, \quad (2)$$

для вязкости

$$\nu = 1,975 - 10,5 \cdot 10^{-2} \times \Delta p + 6,5 \cdot 10^{-3} \cdot \tau + 3,5 \cdot 10^{-3} \cdot T, \quad (3)$$

для водородного показателя

$$pH = 6,425 + 5,17 \cdot 10^{-3} \times \Delta p + 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot \tau + 33,0 \cdot 10^{-3} \cdot T, \quad (4)$$

где Δp – гидравлическое сопротивление контура циркуляции; T – температура жидкости в емкости экспериментальной установки; τ – длительность испытаний.

Уравнения экспоненциальных зависимостей долговечности τ охлаждающей жидкости, содержащей комплексную присадку, от температуры для показателей качества:

для поверхностного натяжения:

$$\tau = 0,01 \cdot \exp(0,05 \cdot T) + 0,023;$$

для вязкости:

$$\tau = 9,9 \cdot 10^3 \cdot \exp(3,9 \cdot 10^{-7} \cdot T) - 9,9 \cdot 10^3;$$

для водородного показателя:

$$\tau = -4,6 \cdot 10^5 \cdot \exp(7,5 \cdot 10^{-7} \cdot T) + 4,6 \cdot 10^5.$$

Проверка адекватности модели с использованием аппарата математической статистики по критериям Фишера дала положительный результат, что позволяет утверждать, что полученные регрессионные зависимости с принятой вероятностью $P=0,95$ могут быть использованы для оценки влияния температуры, гидравлического сопротивления и времени на основные эксплуатационные параметры охлаждающей жидкости.

Влияние температуры жидкости в несколько раз сильнее, чем влияние гидравлического сопротивления системы и длительности эксплуатации на изменение водородного показателя, и на порядки сильнее, чем их влияние на изменение поверхностного натяжения. Значительное влияние температуры может быть объяснено термофлуктуационной теорией природы разрушений. С физической точки зрения следствием термомеханического воздействия, возникающего при прокачивании жидкости по системе охлаждения, является растяжение межатомных связей в молекулах веществ, входящих в раствор, межмолекулярных связей в макромолекулах полимеров и связей, удерживающих ПАВ в мицеллярных образованиях. Конечным результатом такого растяжения является разрыв связей. Очевидно, что в первую очередь будут разрушаться, наиболее, слабые связи. Наиболее слабыми очевидно являются связи между молекулами ПАВ в мицеллярных образованиях и связи между молекулами полимеров в макромолекулярных соединениях. Разрушение таких связей определяет повышение поверхностного натяжения и увеличение вязкости.

Анализ значений коэффициентов регрессионных уравнений позволяет оценить влияние факторов на динамику изменения показателей. Наибольшее влияние на интенсивность старения оказывает температурный фактор, что хорошо согласовывается с термофлуктуационной теорией разрушений. Это можно объяснить малой скоростью движения жидкости. Полученные уравнения регрессионных зависимостей физико-химических свойств жидкости от внешних факторов можно объединить в систему, которая представляет собой математическую модель старения охлаждающей жидкости.

Предложенная математическая модель старения охлаждающих жидкостей была использована для разработки практических рекомендаций по совершенствованию эксплуатации судовых ДВС, обслуживанию систем охлаждения и технологии использования присадок.

Для учета пополнения системы неподготовленной водой в уравнение, описывающее динамику параметра жидкости, был введен коэффициент пополнения

$$K_n = V_{\text{охл}} / (V_{\text{охл}} - V_n),$$

где $V_{\text{охл}}$ – объем внутреннего контура системы охлаждения, дм^3 ; V_n – объем воды без присадки, добавленной во внутренний контур системы охлаждения, дм^3 .

Если система не пополняется, то $K_n = 1$, при пополнении и с его ростом значение коэффициента K_n возрастает, вследствие чего увеличивается скорость старения охлаждающей жидкости.

Под временем циркуляции τ следует понимать отношение

$$\tau = \frac{V_{\text{охл}}}{V_n}, \text{ мин.}$$

где V_n – подача циркуляционного насоса, л/мин.

Таким образом, можно ввести поправочный коэффициент циркуляции

$$K_\tau = \tau_y / \tau_d,$$

где τ_y – время циркуляции лабораторной установки, мин; τ_d – время циркуляции двигателя, мин.

Таким образом, уравнение регрессии, описывающее изменение параметра A охлаждающей жидкости под действием эксплуатационных факторов с учетом поправочных коэффициентов можно представить в виде

$$A = A_0 - \frac{K_n \cdot K_\tau}{2} (\alpha \cdot \Delta p + \beta \cdot \tau + \gamma \cdot T) \quad (5)$$

где A_0 – начальное значение параметра; K_n , K_τ – соответственно коэффициенты пополнения и циркуляции; α , β , γ – коэффициенты уравнения регрессии; Δp – гидравлическое сопротивление внутреннего контура системы охлаждения, кПа; τ – длительность эксплуатации охлаждающей жидкости; T – температура охлаждающей жидкости.

С использованием статистических данных, полученных при эксплуатационных испытаниях присадок [7] уравнение (5) может быть представлено в виде (6):

$$A = A_0 - 1,3 \cdot \frac{V_n}{V_{\text{охл}} - V_n} (\alpha \cdot \Delta p + \beta \cdot \tau + \gamma \cdot T) \quad (6)$$

При отсутствии утечек из внутреннего контура системы охлаждения и пополнения его водой без присадок выражение с учетом характеристик лабораторной установки уравнение (5) будет иметь вид

$$A = A_0 - 1,3 \cdot \frac{V_n}{V_{\text{охл}}} (\alpha \cdot \Delta p + \beta \cdot \tau + \gamma \cdot T) \quad (7)$$

Выбор режимных параметров (Δp , T , K_p , K_t) позволяет проанализировать влияние повышения гидравлического сопротивления внутреннего контура систем охлаждения вследствие его усложнения и включения в него дополнительных элементов (охлаждителя надувочного воздуха), а так же перехода на высокотемпературное охлаждение на возможную продолжительность эксплуатации присадок.

Решение о необходимости улучшения качества жидкости или его замены принимают в результате сопоставления эксплуатационных показателей, характеризующих основные направления ее старения, с их предельно допустимыми значениями.

Практическое использование предложенной математической модели, разработанной на основании термофлуктуационной теории, позволяет прогнозировать срок службы охлаждающих жидкостей, содержащих комплексные присадки, проводить обоснованную регенерацию или замену теплоносителя системы охлаждения, повышает качество технической эксплуатации транспортных ДВС.

Заключение

Процесс деструкции присадок происходит в результате тепловых и турбулентных флуктуаций молекул полимеров и ПАВ и микрообъемов ОЖ, что соответствует термофлуктуационной теории разрушений. Математическая модель старения компонентов присадок представляет собой систему регресси-

онных уравнений, описывающих изменения основных эксплуатационных свойств охлаждающих жидкостей во времени в зависимости от параметров системы охлаждения.

На основании предложенных физической и математической моделей динамики старения охлаждающей жидкости разработана расчетная методика оценки долговечности присадок, учитывающая конструктивные параметры систем охлаждения ДВС, особенности их эксплуатации, и обеспечивающая возможность прогнозирования длительности применения охлаждающей жидкости до достижения установленных предельных значений.

Актуальность мероприятий по поддержанию качества ОЖ будет возрастать с расширением использования высокотемпературного охлаждения транспортных ДВС.

Список литературы:

1. Безюков О.К. Обеспечение и контроль эксплуатационных свойств охлаждающих жидкостей / О.К. Безюков, В.А. Жуков, О.В. Жукова // Двигатели внутреннего сгорания. – № 1. – 2008. – С. 148-152.
2. Журков С.Н. О физических основах температурно-временной зависимости прочности твердых тел / С.Н. Журков, В.А. Петров // Докл. АН СССР. – 1978. – Т. 239, N. – С. 1316-1319.
3. Регель В.Р. Кинетическая природа прочности твердых тел / Регель В.Р., Слуцкер А.Н., Томашевский Э.Б. – М.: Наука, 1974. – 560 с.
4. Жуков В.А. Экспериментальное исследование старения охлаждающих жидкостей двигателей внутреннего сгорания / В.А. Жуков, О.В. Жукова // Актуальные проблемы современной науки. Труды 3-го международного форума. Естественные науки. Часть 3: Механика. Машиностроение. – 2007. – С.33-37.
5. Безюков О.К. Экспериментальное исследование изменений теплофизических свойств охлаждающих жидкостей судовых ДВС / О.К. Безюков, В.А. Жуков, О.В. Жукова // Исследования, проектирование и эксплуатация судовых ДВС. Труды 2-го международного научно-технического семинара. – 2008. – С. 70-76.

УДК 62.755

А.Н. Горбенко, канд. техн. наук

АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ УСТОЙЧИВОСТИ АВТОБАЛАНСИРОВКИ РОТОРА НА ОСНОВЕ ТОЧНОГО РЕШЕНИЯ ЧАСТНОЙ ЗАДАЧИ

Постановка проблемы. Анализ существующих исследований. Цель работы.

Автобалансирующие устройства (АБУ) пассивного типа находят применение в роторных машинах

(РМ) для снижения уровня их вибрации. Их практическое применение сталкивается с проблемой обеспечения устойчивости автобалансирующего режима движения механической системы (МС) ([1-4]). В