

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ВЫСОКОФОРСИРОВАННЫХ ТРАНСПОРТНЫХ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Л.А. Шабалинская, к.х.н., с.н.с., Г.М. Левкин, к.т.н., с.н.с, В.И., Кельбас, к.х.н., с.н.с.;
ООО «Химмотология»;
А.Е. Староверов, к.т.н., с.н.с; ФГУП НИИД

Особенностью эксплуатации транспортных средств с высокофорсированными двигателями является использование их в тяжелых дорожных и климатических условиях, а также вне дорог. Указанные условия работы создают повышенную тепловую и вибрационную нагруженность цилиндрико-поршневой группы, которые вызывают вскипание жидкости и кавитационные разрушения деталей.

Показано, что все виды кавитационных разрушений деталей и вскипание жидкости могут быть в значительной мере предотвращены путем применения в них в качестве охладителя всесезонной охлаждающей жидкости на пропиленгликолевой основе, обладающей достаточным запасом защитной способности от кавитации и имеющей температуру кипения при давлении 101,3 кПа не менее 120 °С.

Высокофорсированными, быстроходными двигателями внутреннего сгорания принято считать такие, в которых средняя скорость поршня достигает более 12 м/с, литровая мощность — 40 кВт/л, а температура охладителя жидкостного охлаждения превышает температуру его кипения при атмосферном давлении. К таким двигателям могут быть отнесены двигатели типов: ЯМЗ-840 (ОАО «Автодизель»), КамАЗ-7403.10 (ОАО КамАЗ), УТД-32 (ОАО «Барнаултрансмаш»), В-84МС (Челябинский тракторный завод «Уралтрак»), Cummins KTA-50-C («Cummins Inc.»).

Особенностью эксплуатации транспортных средств, укомплектованных такими двигателями, является использование их в тяжелых дорожных и климатических условиях, а также вне дорог.

В настоящее время климатический диапазон использования мобильной техники лежит в пределах $-60...+55$ °С, при этом особо трудные условия эксплуатации возникают на границах температурных интервалов.

На работу двигателей значительное влияние оказывает понижение атмосферного давления и плотности воздуха по мере подъема на высоту. Средняя скорость движения, например, автомобиля снижается на 40–60 %. Растет тепло-

напряженность двигателя, снижается его мощность, увеличивается расход топлива, ухудшаются условия теплоотвода от охлаждающей жидкости, повышается дымность и температура отработавших газов.

Работоспособность двигателей силовых установок в таких условиях в большой степени зависит от эффективности их систем охлаждения, в частности от применяемых в них жидкостей [1]. Так, в экстремальных условиях жарко-пустынной и высокогорной местностях существует проблема вспенивания, вскипания и кавитации в жидкости, что приводит к потере работоспособности силовой установки.

С другой стороны, реализация постоянно возрастающих требований к удельным показателям дизельных двигателей силовых установок мобильной техники, прежде всего к мощностным, сопровождается увеличением значений общей теплоотдачи в охлаждающую жидкость и масло при ограниченных габаритах моторно-трансмиссионного отделения. Возможности увеличения теплорассеивающей способности системы охлаждения за счет увеличения фронта радиаторов в ограниченных объемах моторно-трансмиссионных отделений перспективных образцов мобильной техники практически исчерпаны. Увеличение с этой целью расхода воздуха через радиаторы требует дополнительных затрат мощности на привод вентилятора, что значительно снижает эффект форсирования [2, 3].

В этих условиях наиболее эффективным способом увеличения теплорассеивающей способности радиаторов является применение высокотемпературного охлаждения. Повышение температуры охлаждающей жидкости, допустимой для длительной работы, со 115–120 °С (при давлении 0,25 МПа), принятой в существующих системах охлаждения мобильных машин, до 140 °С позволяет при температуре окружающего воздуха +40 °С увеличить теплорассеивающую способность радиаторов более чем на ~ 30%. Одновременно с ростом температурного режима работы дизельного двигателя происходит относительное (в долях от подведенного тепла) уменьшение теплоотдачи в охлаждающую жидкость, а также

некоторое снижение механических потерь. Все это создает предпосылки для увеличения литровой мощности дизельных двигателей до 55 л. с./л. Соответственно может быть увеличена и удельная мощность транспортного средства.

Факторами, ограничивающими применение высокотемпературного охлаждения, как известно, являются термическая стабильность смазочного масла и приемлемая (по условиям прочности радиаторов и соединительных шлангов) величина давления в системе охлаждения (не более 0,25 МПа), необходимая для предотвращения вскипания охлаждающей жидкости при температуре на входе в радиатор (~140°C). К настоящему времени такое всесезонное масло для высокофорсированных дизельных двигателей с рабочей температурой 140–145 °С уже разработано ВНИИ НП М53/16Д2 ТУ 38.401-58-309-02.

Становится очевидной необходимость применения всесезонной охлаждающей жидкости с улучшенными свойствами, обеспечивающей надежную защиту системы охлаждения от образования отложений, вспенивания, вскипания, перегрева двигателя, кавитационного разрушения и оптимизированной для алюминиевых радиаторов и двигателей с блоками из алюминиевого сплава.

Кавитационное разрушение, вызываемое форсированием двигателя, является комплексным процессом воздействия механического и электрохимического факторов на детали, находящиеся в условиях коррозионной среды и высокочастотной вибрации [4].

В зависимости от типа двигателя, конструкции втулки цилиндра и ряда других факторов количество и качество кавитационных разрушений может быть различным [5]. Однако все виды разрушения могут быть в значительной мере предотвращены путем применения в них жидкостей, обладающих достаточным запасом защитной способности от кавитации.

В настоящей работе исследовались возможности создания охлаждающей жидкости с температурой кипения не менее 140 °С при давлении 0,25 МПа и одновременно защищающую поверхность деталей системы охлаждения от кавитационного разрушения.

В российской нормативной документации регламентирован ассортимент охлаждающих жидкостей, допущенных к применению Межведомственной комиссией и разработчиками мобильной техники, включающий в себя ОЖ-65 «Лена» ТУ 113-07-02, ГОСТ 28084 [5] и Марка-65 ГОСТ 159 [6].

В данных нормативных документах показатель, характеризующий защитную способность от кавитационного разрушения, отсутствует. За рубежом

определение такого показателя для охлаждающих жидкостей регламентируется рядом стандартов на охлаждающие жидкости [7, 8] и на метод испытаний [9], а также предписывается разработчиками и изготовителями двигателей в Инструкции по эксплуатации.

В качестве примера рассмотрен документ Cummins Inc. № 93 Т8-6 (1993 г.) «Указания по техническому обслуживанию дизелей в отношении воды и добавок к охлаждающей жидкости». Данным документом предписывается обязательное использование в системах охлаждения двигателей Cummins «охлаждающей жидкости для интенсивных условий работы», определенной как смесь 50 % антифриза и 50 % ингибитора коррозии DCA4 (или другого такого типа), и фильтра для охладителя, содержащего брикет с порошкообразным ингибитором. Аналогичные рекомендации дает и «Ford Motor Co» для дизельных двигателей типа Navigator 6/9L, 7.3L и T444E Power Stroke.

Степень эффективности охлаждения высокофорсированных транспортных дизельных двигателей определялась путем сравнительной оценки защитной способности от кавитационного разрушения серийными охлаждающими жидкостями и опытной, улучшенной по высокотемпературным свойствам.

Объектами исследования являлись охлаждающие жидкости серийного производства на этиленгликолевой основе ОЖ-65 «Лена» по ТУ 113-07-02 и Марки-65 по ГОСТ 159 и охлаждающие опытные жидкости на пропиленгликолевой основе ПФ НАТИ-1, ПФ НАТИ-2 (с температурой кипения 102°C при давлении 101,3 кПа, что создает предпосылку для реализации температуры кипения 140 °С при повышении давления до 0,25 МПа) [10], а также ингибитор коррозии DCA4 (Fleetguard) и дистиллированная вода.

Оценка защитной способности охлаждающих жидкостей от воздействия кавитации проводилась методом в соответствии с полученным авторами патентом [11].

Сущность метода заключалась в использовании ультразвукового диспергатора типа УЗДН с выходной мощностью 0,1–2 кВт, рабочей частотой 22 кГц, с коническим волноводом-излучателем. Эталонный металлический образец помещался под рабочей частью волновода-излучателя. При работе излучателя, погруженного в испытуемую жидкость, на его торце возбуждаются высокочастотные продольные колебания, а в жидкости над образцом возникает вибрационная кавитация.

Кавитация вызывает кавитационные эрозию и коррозию рабочей поверхности металлического образца. В качестве критерия оценки защитной способности жидкости принимаются скорости

кавитационного разрушения как суммарного процесса эрозии и коррозии. Процесс оценивается при двух критических температурах, соответствующих пусковым и эксплуатационным условиям, и соотношение потерь массы образца в эталонной жидкости к потерям массы образца в испытуемой жидкости по следующим формулам:

$$V = \frac{m}{t}, \text{ мг/ч и } Z = \frac{V_э}{V_x}, \text{ балл,}$$

где m — потери массы металлического образца, мг; t — продолжительность испытания, ч; Z — защитная способность от кавитации, балл; $V_э$ — скорость разрушения в эталонной жидкости, мг/ч; V_x — скорость разрушения в испытуемой жидкости, мг/ч.

В качестве эталонной жидкости для определения защитной способности испытуемой жидкости на водно-гликолевой основе была выбрана дистиллированная вода как наиболее агрессивная среда для наиболее разрушаемых металлов — алюминиевых сплавов.

Оптимальными температурами испытания жидкостей выбирались такие, при которых про-

исходит наибольшее кавитационное разрушение алюминиевых сплавов, и являющиеся максимальными в процессе эксплуатации при давлении в системе охлаждения 101,3 кПа, что определило температурный диапазон испытаний, соответствующий 30–95 °С.

Было проведено несколько серий экспериментов на ультразвуковых установках УЗДН А разной мощности (130 и 300 Вт) с оценкой степени воздействия кавитации на различные металлы: чугун втулок двигателей Cummins KTA-50 С, сталь 38ХМЮА, алюминиевые сплавы А09 и АК7М2МГ в различных средах охлаждающих жидкостей.

Результаты испытаний защитной способности от кавитации этиленгликолевых и пропиленгликолевых охлаждающих жидкостей, проведенных в указанных условиях, представлены в табл. 1–3. Для изучения температурной зависимости скорости кавитационного разрушения было учтено то обстоятельство, что различные плотности чугуна (7,52 г/см³), стали (7,82 г/см³) и алюминия (2,75 г/см³) обуславливают различный объем кавитационных повреждений, или каверн. По-

Таблица 1

Защитная способность от кавитации и фазовые характеристики примеров охлаждающих жидкостей

Наименование показателя	Эталон (вода дистиллированная)	Наименование охлаждающей жидкости		
		Марка-65	ПФ НАТИ-1	ПФ НАТИ-2
Защитная способность от кавитации, балл	1	0,45	2	8
Скорость кавитационного разрушения, мг/ч (алюминиевый сплав АК7М2МГ, 22 кГц, 90°С)	4	9	2	0,5
Температура кипения, °С, при 101,3 кПа	100	114	112	120
Температура замерзания, °С, при 101,3 кПа	0	–65	–60	–67

Таблица 2

Оценка влияния температуры на скорость кавитационного разрушения при испытаниях на УЗДН-А с выходной мощностью 300 Вт

Примеры		Скорость кавитационного разрушения, мг/ч, при температуре		
Охладитель	Металл	25 °С	60 °С	95 °С
Вода дистиллированная	Алюминиевый сплав А09	48,5	13,9	6,7
	Сталь 38ХМЮА	17,62	6,72	4,15
	Чугун втулки Камминз КТА-50	10,89	8,14	6,16
ОЖ-65 «Лена»	Алюминиевый сплав А09	16,3	13,9	10,6
	Сталь 38ХМЮА	3,2	2,74	2
	Чугун втулки Камминз КТА-50	2,24	3	3,54
ПФ НАТИ-1	Алюминиевый сплав А09	7,1	4,64	4,64
	Сталь 38ХМЮА	2,8	2,26	1,9
	Чугун втулки Камминз КТА-5	3,14	2,43	2,28
Марка-65	Алюминиевый сплав А09	12,68	10,52	10,08
	Сталь 38ХМЮА	3,09	2,72	2,44
ДСА4*	Алюминиевый сплав А09	—	2,78	—
	Сталь 38ХМЮА	—	1,37	—
	Чугун втулки Cummins КТА50 С	1,30	1,47	1,85

* Охлаждающая жидкость для интенсивных условий работы приготовлена в соответствии с «Указаниями по техническому обслуживанию дизелей в отношении воды и добавок к охлаждающей жидкости», № 93 Т8-6(1993), Cummins Inc.

Таблица 3

Оценка влияния температуры на защитную способность охлаждающих жидкостей при испытаниях на УЗДН-А с выходной мощностью 300 Вт

Охладитель	Примеры Металл	Защитная способность от кавитации, балл при температуре		
		25 °С	60 °С	95 °С
ОЖ-65 «Лена»	Алюминиевый сплав А09	3,0	1,0	0,62
	Сталь 38ХМЮА	5,6	2,52	3,12
	Чугун втулки Камминз КТА-50	5,0	2,74	1,76
ПФ НАТИ-1	Алюминиевый сплав А09	6,8	3,0	1,44
	Сталь 38ХМЮА	6,43	3,0	2,23
	Чугун втулки Камминз КТА-5	3,54	3,39	2,74
Марка-65	Алюминиевый сплав А09	3,82	1,3	0,66
	Сталь 38ХМЮА	5,82	2,54	1,74
ДСА4*	Алюминиевый сплав А09	—	5,0	—
	Сталь 38ХМЮА	—	5,03	—
	Чугун втулки Cummins КТА50 С	8,0	5,6	3,37

* См. примечание к табл. 2.

Таблица 4

Оценка влияния температуры на скорость кавитационного разрушения при испытаниях на УЗДН-А с выходной мощностью 300 Вт в пересчете на глубину каверн

Охладитель	Примеры Металл	Скорость кавитационного разрушения, мг/ч, при температуре		
		25 °С	60 °С	95 °С
Вода дистил- лированная	Алюминиевый сплав А09	783	224	108
	Сталь 38ХМЮА	102	39	24
	Чугун втулки Камминз КТА-50	66	49	37
ОЖ-65 «Лена»	Алюминиевый сплав А09	263	224	172
	Сталь 38ХМЮА	18,1	15,5	11,8
	Чугун втулки Камминз КТА-50	13,3	17,6	21
ПФ НАТИ-1	Алюминиевый сплав А09	114,7	75	75
	Сталь 38ХМЮА	15,8	12,8	10,8
	Чугун втулки Камминз КТА-5	18,6	14,4	13,5
Марка-65	Алюминиевый сплав А09	205	170	163
	Сталь 38ХМЮА	17,5	15,4	13,8
ДСА4*	Алюминиевый сплав А09	-	45	-
	Сталь 38ХМЮА	-	7,75	-
	Чугун втулки Cummins КТА50 С	8,2	8,7	11

* См. примечание к табл. 2.

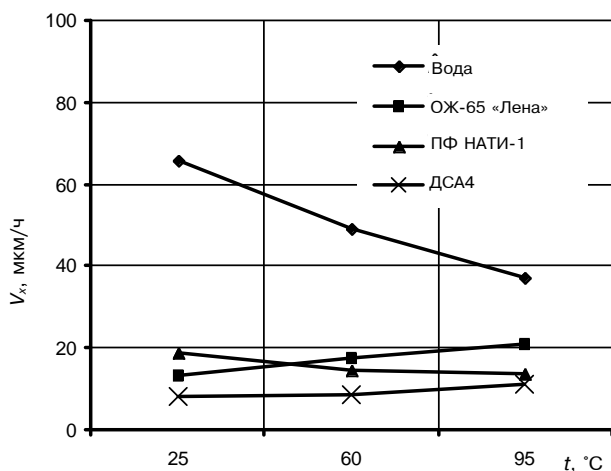


Рис. 1. Зависимость скорости кавитационного разрушения чугунного образца от температуры в различных охлаждающих жидкостях

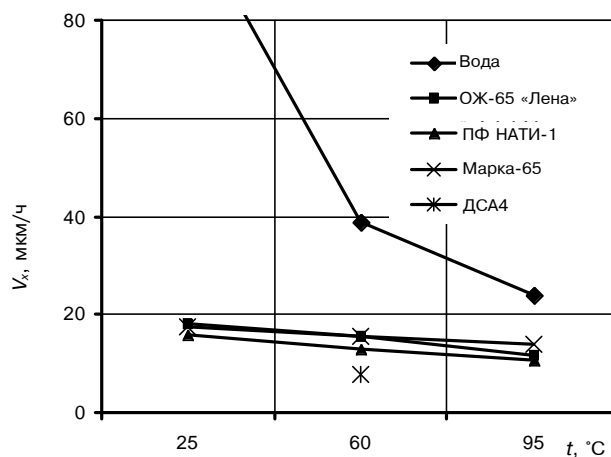


Рис. 2. Зависимость скорости кавитационного разрушения стального образца от температуры в различных охлаждающих жидкостях

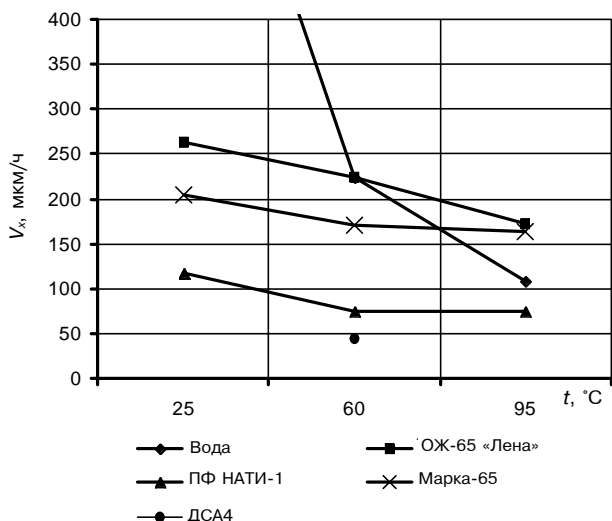


Рис. 3. Зависимость скорости кавитационного разрушения алюминиевого образца от температуры в различных охлаждающих жидкостях

этому для более полного понимания динамики процесса кавитационного разрушения деталей системы охлаждения двигателя данные, представленные в табл. 2, были пересчитаны на усредненную глубину каверн в мкм/ч по методике ЦНИДИ, описанной в [12]. Результаты проведенного пересчета приведены в табл. 4, а графики построенных температурных зависимостей защитной способности от кавитации представлены на рис. 1–3.

Анализ результатов проведенного исследования выявляет ряд закономерностей.

1. Изменение температуры испытания оказывает значительное и различное влияние на интенсивность кавитационной эрозии металлов в среде охлаждающих жидкостей на этилен- и пропиленгликолевой основе, приводя в одних случаях к снижению, а в других — к увеличению кавитационного износа металлических образцов.

2. Защитная способность от кавитационной эрозии металлов охлаждающих жидкостей на пропиленгликолевой основе в 1,5–2,5 раз превышает защитную способность охлаждающих жидкостей на этиленгликолевой основе.

3. Улучшенная по высокотемпературным свойствам модификация жидкости на пропиленгликолевой основе ПФ НАТИ-2, температура кипения которой при 103,1 кПа составляет 120 °С, обладает значительно лучшей защитной способностью от кавитации по отношению к алю-

минию при повышенных температурах, чем охлаждающая жидкость на этиленгликолевой основе типа Марка-65 и сравнимой с таковой для «Охлаждающей жидкости для интенсивных условий работы с добавкой ингибитора DCA4».

Проведенные исследования показывают возможность обеспечения эффективного охлаждения высокофорсированных транспортных дизелей путем создания перспективной по высокотемпературным и антикавитационно-эрозионным свойствам охлаждающей жидкости.

Литература

1. Суранов Г.И. Уменьшение износа автотракторных двигателей при пуске. — М., 2000. — 214 с.
2. Петриченко Р.М. Системы жидкостного охлаждения быстроходных двигателей внутреннего сгорания. — Л.: Машиностроение, 1975. — 224 с.
3. Драгомиров С.Г. Перспективные направления развития систем охлаждения автомобильных двигателей // Электроника и электрооборудование транспорта. — 2006. — № 1. — С. 8–11.
4. Иванченко Н.Н., Скуридин А.А., Никитин М.Д. Кавитационные разрушения в дизелях. ГОСТ. — Л.: Машиностроение, 1970. — 152 с.
5. ГОСТ 28084-89. Технические условия. Жидкости охлаждающие низкотемпературные. Изд-во стандартов, 1989.
6. ГОСТ 159-52. Жидкость охлаждающая низкотемпературная. Изд-во стандартов, 1974.
7. ASTM D 4985-94 / Standard Specification for Low Silicate Ethylene Glycol Base Engine Coolant for Heavy Duty Engines Requiring a Pre-Charge of Supplemental Coolant Additive (SCI).
8. ASTM D 6210-04. Standard Specification for Fully-Formulated Glycol Base Engine Coolant for Heavy Duty Engines.
9. ASTM D 2809-94. Standard Test Method for Cavitation-Corrosion and Erosion-Corrosion Characteristics of Aluminum Pumps With Engine Coolants.
10. Заявка на изобр. №2006105798/04(00279). Шабалинская Л.А., Кельбас В.И., Левкин Г.М., Староверов А.Е. Охлаждающая жидкость для высокофорсированных двигателей внутреннего сгорания и тяжелых условий эксплуатации МПК F 01N3/22, C09K 5/10. Приоритет от 27.02.2006.
11. Патент №2276346 RU. Шабалинская Л.А., Левкин Г.М., Кельбас В.И. Способ определения защитной способности жидкостей охлаждающих и гидравлических от кавитации. МПК C1 G01N 17/00. Оpubл. 10.05.2006. Бюл. № 13.
12. Стативкин Г.П. Ультразвуковые методы испытаний деталей дизелей на износ. — ЦНИИТЭИтяжмаш. Сер. 4. — 1991. — Вып. 1. — С. 32.