

УДК 621.43.57

ТЕПЛОВАЯ АККУМУЛЯТОРНАЯ ЗАЩИТА ДВИГАТЕЛЕЙ АВАРИЙНО-СПАСАТЕЛЬНЫХ МАШИН

Я. О. ШАБЛОВСКИЙ, кандидат физико-математических наук, доцент

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Для сокращения продолжительности послепускового прогрева аварийно-спасательных машин в зимний период предложено применять комплексную тепловую аккумуляторную защиту двигателя внутреннего сгорания, его узлов и электроаккумуляторной батареи путем утилизации теплоты работающего двигателя. Выявлены наиболее перспективные наполнители таких кожухов. Предложены конструктивные схемы тепловых аккумуляторов, предназначенных для поддержания положительной температуры охлаждающей жидкости и для повышения эффективности каталитической очистки выхлопных газов.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, пуск двигателя, послепусковой прогрев, тепловой аккумулятор.

Введение

Известно, что двигатель внутреннего сгорания не может развить номинальную мощность сразу после пуска. Нормализация процессов смесеобразования и сгорания топлива, а также стабилизация кинетики трения подвижных частей занимают определенное время, тем большее, чем ниже температура окружающей среды.

Климатические условия Республики Беларусь таковы, что не менее трех месяцев в году эксплуатация мобильных машин производится при отрицательной температуре. Для пуска дизелей при температурах ниже $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ применяют легковоспламеняющиеся пусковые жидкости, подаваемые в двигатель отдельно от топлива при помощи специальных устройств [1]. Холодный пуск карбюраторных двигателей существенно облегчается при использовании «зимнего» топлива – бензина с повышенным (не менее 20 %) содержанием легкокипящих фракций [2]. Указанные меры, как правило, избавляют от необходимости предпускового прогрева двигателя (по крайней мере, при морозах до $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$), но тем самым существенно увеличивают продолжительность послепускового прогрева. Между тем послепусковой прогрев двигателей внутреннего сгорания крайне нежелателен.

Во-первых, послепусковой прогрев связан с дополнительными затратами топлива, что особенно существенно в зимнее время. Во-вторых, работа холодного двигателя чрезмерно изнашивает его подвижные детали и одновременно вызывает осмоление неподвижных частей.

Для аварийно-спасательных машин проблема минимизации продолжительности послепускового прогрева особенно актуальна, поскольку такие машины требуется нагружать в кратчайший срок после пуска. Одним из возможных путей решения этой проблемы является применение комплексной тепловой аккумуляторной защиты двигателя, сущность которой излагается ниже.

Основная часть

Для замедления остывания заглушенного двигателя при безгаражном отстое автомобилей в зимнее время широко применяются разнообразные утеплительные чехлы [3]. При этом, по сути, осуществляется примитивное теплоаккумулирование, поскольку аккумулятором теплоты является любое нагретое тело [4], в том числе нагретый во время своей работы двигатель. Однако эффективность такого теплоаккумулирования крайне низка.

Наибольшая удельная энергоемкость достигается при поглощении теплоты в ходе фазового превращения. При этом, в отличие от теплоты, поглощенной в результате «обычного» нагрева, скрытая теплота фазового превращения выделяется при остывании не непрерывно, а при определенной температуре, именно при температуре фазового превращения данного вещества $T = T_\lambda$ [5]. На продуктивность применения теплового аккумулятора такого типа в автомобильном хозяйстве обратил внимание В. В. Шульгин [6], который предложил усовершенствовать стандартный метод предпускового водоразогрева и пропускать через систему охлаждения разогреваемого двигателя воду либо охлаждающую жидкость, нагретую теплотой фазового превращения рабочего вещества теплового аккумулятора. Однако для эффективного прогрева двигателя названным способом необходима жидкость с температурой T не ниже 90°C [7]. Соответственно, такой же должна быть температура фазового превращения рабочего вещества теплового аккумулятора, так что собственная температура этого вещества при отстое автомобиля должна поддерживаться еще более высокой. Последнее затрудняет реализацию технического решения [6].

Между тем работа двигателя на начальной стадии определяется не только температурой его цилиндров, но и начальной температурой топлива, а также эффективностью подачи электроэнергии от аккумуляторных батарей к стартеру и вязкостью масла [8]. При этом температура, до которой двигатель может быть охлажден без последующих затруднений при пуске и существенных износов при послепусковом прогреве, составляет от 5 до 20°C [9]. Следовательно, издержки холодного отстоя автомобиля можно минимизировать, обеспечив поддержание температуры его двигателя на указанном уровне. Для этого целесообразно совместить утепление основных агрегатных узлов автомобиля с аккумулярованием теплоты фазового превращения посредством применения теплоаккумулирующих кожухов.

Устройство теплоаккумулирующего кожуха поясняется рисунком 1.

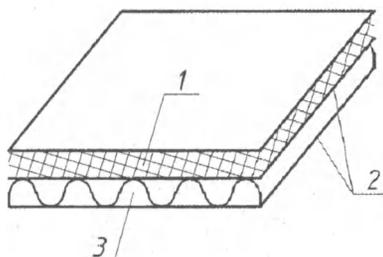


Рисунок 1 – Внутреннее строение теплоаккумулирующего кожуха

Верхний слой 1 является теплоизоляционным (минеральная вата и т. п.). Нижний слой образован плоскопараллельными пластинами 2, разделенными гофрированной пластиной для образования каналов 3. Указанные пластины изготавливаются из металла с высокой теплопроводностью (например, из меди марок М1р {М1ф} либо М2р), а каналы между ними заполняются кристаллическим теплоаккумулирующим ве-

ществом с температурой фазового превращения в окрестности 5–20 °С. Теплофизические характеристики некоторых веществ, пригодных для применения в качестве наполнителей теплоаккумулирующих кожухов, указаны в таблице 1 (данные заимствованы из литературных источников [10], [11]).

Таблица 1 – Наполнители для теплоаккумулирующих кожухов

Вещество	Температура фазового превращения, °С	Теплота фазового превращения, кДж/кг
$\text{LiClO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	8,2	155
$\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	14,0	109
$(0,45\text{CaCl}_2 + 0,55\text{CaBr}_2) \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	14,7	140
$\text{KF} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	18,5	231
$\text{FeBr}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	21,0	105
$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	21,0	140

Таковыми кожухами целесообразно снабдить электроаккумуляторную батарею, масляный картер и топливный бак. Работающий двигатель прогревает подкапотное пространство, в результате чего нагретый теплоаккумулирующий наполнитель каналов 3 претерпевает фазовое превращение с поглощением теплоты (плавление либо полиморфный переход в высокотемпературную модификацию). Если при слишком длительном холодном отстое машины действие внешней теплоизоляции кожуха (слой 1) окажется недостаточным и температура электроаккумуляторной батареи, картера и (или) топливного бака понизится до порогового значения, а именно до точки фазового превращения наполнителя каналов 3, то последний испытает фазовое превращение с выделением теплоты, что воспрепятствует дальнейшему остыванию.

Осуществление вышеописанной термостабилизации позволяет существенно снизить рабочую температуру теплового аккумулятора, применяемого для подогрева жидкости, пропускаемой через систему охлаждения при разогреве двигателя. Вещества, пригодные для использования в качестве наполнителя теплового аккумулятора предпускового прогрева, указаны в таблице 2; теплофизические характеристики этих веществ заимствованы из обзора [11]. Предлагаемая конструкция теплового аккумулятора предпускового прогрева представлена на рисунке 2.

Таблица 2 – Наполнители для тепловых аккумуляторов предпускового прогрева

Вещество	Температура фазового превращения, °С	Теплота фазового превращения, кДж/кг
$\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	57,0	169
$\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	58,0	265
$\text{NaAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	61,0	181
$\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	65,0	190
$\text{CH}_3\text{COOLi} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	70,0	150
$\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	72,0	155
$\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	78,0	265

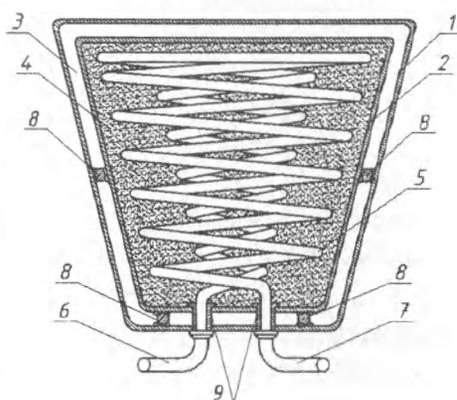


Рисунок 2 – Тепловой аккумулятор для предпускового прогрева

Устройство состоит из внешнего 1 и внутреннего 2 корпусов, выполненных из нержавеющей стали (например, 12X18Н10Т, 12X18Н9Т, 12X17Г9АН4, 10X14Г14Н4Т, 08X18Н10) и разделенных вакуумом либо порошково-вакуумной теплоизоляцией 3. Внутри корпуса 2, заполненного теплоаккумулирующим веществом 4, размещена выполненная по ГОСТ 21646–2003 из меди марок М1р (М1ф) или М2р спиралевидная трубка 5, сообщенная при помощи патрубков входа 6 и выхода 7 с системой охлаждения двигателя. Для снижения тепловых потерь перегородки 8 и втулки 9 выполняют из материала с низким коэффициентом теплопроводности (пеноалюминий либо сплавы на основе титана марок ВТ1, ВТ5-1, ВТ20). Выполнение корпуса теплового аккумулятора V-образным, а точнее в форме опрокинутого усеченного конуса, минимизирует эффект воздействия на корпус механических напряжений, обусловленных скачком удельного объема наполнителя в точке фазового превращения, что, в свою очередь, избавляет от необходимости ограничиваться при выборе наполнителя веществами, незначительно изменяющими при фазовом превращении свой объем.

Работа устройства осуществляется следующим образом.

Тепловой аккумулятор заряжается во время работы двигателя, когда нагретая его сбросной теплотой охлаждающая жидкость нагнетается через входной патрубок 6 для циркуляции по спиралевидной трубке 5 и возвращается через патрубок выхода 7 в систему охлаждения двигателя. Циркулирующая по трубке 5 охлаждающая жидкость нагревает теплоаккумулирующий материал, испытывающий при этом фазовое превращение с поглощением теплоты. Тепловая изоляция 3 поддерживает температуру тепло-

аккумулирующего вещества 4 на уровне, превышающем температуру его фазового превращения, и обеспечивает хранение аккумулированной тепловой энергии.

Тепловой аккумулятор разряжается перед запуском холодного двигателя в результате теплообмена между охлаждающей жидкостью, циркулирующей по трубке 5, и теплоаккумулирующим веществом 4. Остывание теплоаккумулирующего вещества в процессе указанного теплообмена сопровождается фазовым превращением с выделением теплоты (кристаллизация либо полиморфный переход в низкотемпературную модификацию), что обеспечивает нагрев охлаждающей жидкости. Последняя через выходной патрубок 7 поступает к двигателю и разогревает его.

Применение тепловых аккумуляторов позволяет также существенно повысить экологическую безопасность аварийно-спасательных машин.

Для очистки выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания широко применяются каталитические реакторы, нейтрализующие содержащиеся в выхлопных газах углеводороды C_xH_y , оксиды азота N_xO_y и угарный газ CO [12]. Интенсивность каталитических процессов в реакторе существенно зависит от температуры газов: для их эффективной очистки необходима температура от 250 °С и выше [13]. При пуске двигателя температура выхлопных газов существенно ниже, вследствие чего каталитическая очистка выхлопных газов пускаемого двигателя оказывается неэффективной. Помимо этого при использовании каталитических нейтрализаторов окислительного типа очистка выхлопных газов оказывается неэффективной также и при сбросе нагрузки (см. ниже). Между тем при проведении аварийно-спасательных работ пуск машин и их работа на холостом ходу часто осуществляются в местах сосредоточения личного состава, что усугубляет вредное воздействие выбросов.

Эффективность очистки выхлопных газов можно повысить, стабилизировав температуру каталитического нейтрализатора путем его размещения внутри теплового аккумулятора. Соответствующее техническое решение для каталитических нейтрализаторов восстановительного типа представлено в работе [14]. Здесь мы рассмотрим повышение эффективности каталитической нейтрализации выхлопных газов реакторами окислительного типа.

Особенностью каталитических нейтрализаторов окислительного типа является немонотонная (М-образная) зависимость их эффективности от температуры. Именно при температурах выхлопных газов от 350 до 450 °С* монооксид азота NO, окисляясь, превращается в значительно более токсичный диоксид азота NO₂ [15], так что токсичность выхлопных газов в результате каталитических процессов не уменьшается, а увеличивается. Поэтому при применении каталитических нейтрализаторов окислительного типа необходимо исключить температурные режимы, соответствующие диапазону 350–450 °С.

Такие температуры выхлопных газов достигаются при сбросе нагрузки, поэтому поставленная задача особенно актуальна для двигателей машин, работающих с частым чередованием номинального режима и холостого хода. Принципиальная схема теплового аккумулятора, позволяющего стабилизировать температурный режим каталитической очистки выхлопных газов при пуске двигателя и при сбросе нагрузки, представлена на рисунке 3.

Тепловой аккумулятор имеет теплоизолирующий кожух 1 и металлический корпус 2, изготовленный из нержавеющей стали (например, 12X18H10T, 12X18H9T, 12X17Г9АН4, 10X14Г14Н4Т, 08X18H10). Объем корпуса 2 заполнен двумя различными теплоаккумулирующими веществами 3 и 4, способными претерпевать обратимые фазовые превращения (переход «плавление – кристаллизация», полиморфные превра-

*Более точные значения температурных границ зависят от типа катализатора.

щения), сопровождающиеся выделением/поглощением теплоты. Эти вещества разделены металлической стенкой 5, так что в непосредственном тепловом контакте с каталитическим реактором 6 находится только одно из них – вещество 4, имеющее температуру фазового превращения $T_{\lambda} = T'_{\lambda} \approx 250 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (например, нитрат лития LiNO_3 : $T_{\lambda} = 252 \text{ }^{\circ}\text{C}$, теплота фазового превращения 530 кДж/кг [16]). При этом вещество 3 имеет температуру фазового превращения $T_{\lambda} = T''_{\lambda} \geq 450 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (например, смесь 48 % NaCl и 52 % MgCl_2 : $T_{\lambda} = 450 \text{ }^{\circ}\text{C}$, теплота фазового превращения 431 кДж/кг [16]).

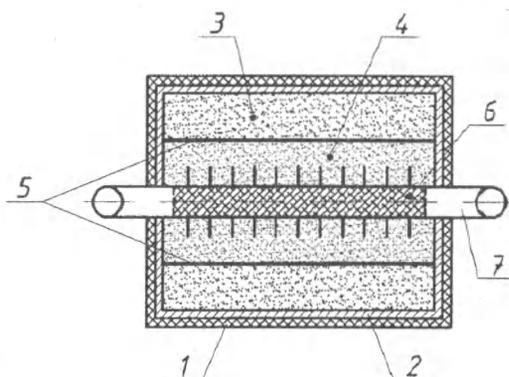


Рисунок 3 – Тепловой аккумулятор реактора каталитической очистки выхлопных газов

Тепловой аккумулятор работает следующим образом.

При работе двигателя в номинальном режиме нагреваемые проходящими через трубу 7 отработавшими газами теплоаккумулирующие вещества 3 и 4 претерпевают фазовое превращение с поглощением скрытой теплоты (плавление либо полиморфный переход в высокотемпературную модификацию).

При работе двигателя в режимах, отличных от номинальных (пуск, сброс нагрузки), температура отработавших газов в трубе 7 снижается, что приводит к остыванию теплоаккумулирующих веществ. Понижение температуры до точки $T_{\lambda} = T''_{\lambda}$ после сброса нагрузки вызывает фазовое превращение вещества 3 с выделением в объеме корпуса 2 теплоты, поддерживающей температурный режим, необходимый для каталитической очистки выхлопных газов без риска образования диоксида азота NO_2 . Дальнейшее понижение температуры до точки $T_{\lambda} = T'_{\lambda}$ при отстое двигателя перед повторным пуском вызывает фазовое превращение вещества 4, выделение скрытой теплоты которого позволит поддержать повышенную температуру катализатора, необходимую для эффективной очистки выхлопных газов двигателя при его пуске.

Заключение

Для облегчения пуска и, в особенности, для сокращения продолжительности послепускового прогрева аварийно-спасательных машин в зимний период необходимо применять теплоаккумулирование. С этой целью с помощью теплоаккумулирующих веществ целесообразна утилизация теплоты работающего двигателя не только в системе охлаждения, но и в теплоаккумулирующих кожухах топливного бака, маслопроводной системы и электроаккумуляторной батареи.

Литература

- 1 Бакуревич, Ю. Л. Эксплуатация автомобилей на Севере / Ю. Л. Бакуревич, С. С. Толкачев. – М. : Транспорт, 1973. – 180 с.
- 2 Гуреев, А. А. Топлива, смазочные материалы и жидкости для эксплуатации автомобилей и тракторов в северных районах / А. А. Гуреев. – М. : Химия, 1976. – 181 с.

- 3 Барон, С. Г. Совершенствование безгаражного хранения автомобилей в зимнее время / С. Г. Барон // Комплексное развитие производственно-технической базы автомобильного транспорта. – М. : Транспорт, 1974. – С. 93–110.
- 4 Левенберг, В. Д. Аккумуляирование тепла / В. Д. Левенберг, М. Р. Ткач, В. А. Гольцстрем. – Киев : Техника, 1991. – 112 с.
- 5 Шишкин, Н. Д. Тепловые аккумуляторы с фазовым переходом / Н. Д. Шишкин, Ю. В. Цымбалюк. – Ростов н/Д, 2005. – 120 с.
- 6 Шульгин, В. В. Тепловые аккумуляторы автотранспортных средств / В. В. Шульгин. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2005. – 268 с.
- 7 Семенов, Н. В. Эксплуатация автомобилей в условиях низких температур / Н. В. Семенов. – М. : Транспорт, 1993. – 190 с.
- 8 Микулин, Ю. В. Пуск холодных двигателей при низкой температуре / Ю. В. Микулин, В. В. Карницкий, Б. А. Энглин. – М. : Машиностроение, 1971. – 216 с.
- 9 Крамаренко, Г. В. Безгаражное хранение автомобилей при низких температурах / Г. В. Крамаренко, В. А. Николаев, А. И. Шаталов. – М. : Транспорт, 1984. – 136 с.
- 10 Теплофизические свойства теплоаккумулирующих материалов: кристаллогидраты / А. Г. Мозговой [и др.]. – Ин-т высоких температур ; Науч.-информ. центр по теплофиз. свойствам чистых веществ. – М., 1990. – 105 с.
- 11 Review on thermal energy storage with phase change materials and applications / A. Sharma [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2009. – Vol. 13, № 2. – P. 318–345.
- 12 Горбунов, В. В. Токсичность двигателей внутреннего сгорания / В. В. Горбунов, Н. Н. Патрахальцев. – М. : Изд-во РУДН, 1998. – 214 с.
- 13 Шаймарданов, А. С. Повышение эффективности процесса очистки выхлопных газов на высокопористых ячеистых катализаторах : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Рос. химико-технолог. ун-т им. Д. И. Менделеева. – М., 2011. – 16 с.
- 14 Шабловский, Я. О. Повышение экологической безопасности двигателей внутреннего сгорания / Я. О. Шабловский // Чрезвычайн. ситуации. – 2011. – Т. 6, № 2. – С. 87–90.
- 15 Корнилов, Г. С. Теоретическое и экспериментальное обоснование способов улучшения экологических показателей автомобильных дизелей : дис. ... д-ра техн. наук / НАМИ. – М., 2005. – 429 с.
- 16 Бекман, Г. Тепловое аккумуляирование энергии / Г. Бекман, П. Гили. – М. : Мир, 1987. – 272 с.

Поступила в редакцию 03.02.2012

Ya. Shablovsky

HEAT-ACCUMULATION DEFENCE FOR ENGINES OF EMERGENCY MACHINES

To reduce the duration of the post-start warming up of emergency machines in winter it is proposed to apply complex heat-accumulation defence of combustion engines. It is reasonable to utilize the heat of a working engine not only in the cooling system but also in the heat-retaining shells of fuel tank, oiling system and electro-storage battery. The most perspective fillers of such shells are indicated. The structural charts of thermal accumulators, intended for maintenance of positive temperature of cooling liquid and for the increase of efficiency of the catalytic cleaning of exhaust gases by means of temperature stabilizing in a neutralizing reactor at abnormal regimes of engine work are offered.