

Таблица 2. Результаты расчета расхода топлива

| Группа дорог    |                   | 1     |       | 2     |       | 3     |       | 4     |       | 5     |       |
|-----------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Режим испытаний | $V_{см},$<br>км/ч | 82    | 56    | 56    | 36    | 56    | 36    | 56    | 36    | 36    | 23    |
|                 | $i_{см}$          | 1     | 1,45  | 1,45  | 2,26  | 1,45  | 2,26  | 1,45  | 2,26  | 2,26  | 3,5   |
|                 | $t_{б}/t_{м}$     | 0,61  |       | 0,025 |       | 0,8   |       | 15,2  |       | 0,3   |       |
|                 | $P_{т}, Н$        | 252   | 99    | 204   | 6     | 313   | 92    | 443   | 222   | 556   | 335   |
| $\eta_{icm}$    |                   | 0,349 | 0,313 | 0,319 | 0,288 | 0,329 | 0,293 | 0,342 | 0,302 | 0,309 | 0,282 |
| $Q, л/100км$    |                   | 8,48  |       | 9,9   |       | 11,3  |       | 13,2  |       | 14,7  |       |

## Вывод

Предлагаемая методика позволяет отказаться от трудоёмких, требующих специальных полигонов дорожных испытаний, и имеет ряд преимуществ: обеспечивает индивидуальный подход к каждому автомобилю при нормировании топлива, возможность создания маршрутных норм, независимость проведения испытаний от погодных условий и оперативное изменение норм при изменившихся условиях работы автомобиля по комплексному критерию – средней скорости движения.

## Список литературы:

1. Яковлев Н.А. Теория автомобиля – М.: Высшая школа, 1962. – 300 с.
2. Говорущенко Н.Я., Туренко А.Н. Системотехника транспорта (на примере автомобильного транспорта). – Харьков: РИО ХГАДТУ, 1998. – 219 с.
3. Говорущенко Н.Я., Туренко А.Н. Системотехника проектирования транспортных машин – Харьков: РИО ХНАДУ, 2002. – 166 с.
4. Краткий автомобильный справочник. – М.: НИИАТ Трансконсалтинг, 1994. – 734 с.

УДК 621.436.068

Ю.И. Шеховцов, асп., В.А. Звонов, д-р техн. наук, Л.С. Заиграев, канд. техн. наук

## ВЫБОР СТРАТЕГИИ ТЕРМОКАТАЛИТИЧЕСКОЙ РЕГЕНЕРАЦИИ ДИЗЕЛЬНОГО САЖЕВОГО ФИЛЬТРА

Современное экологическое законодательство предъявляет высокие требования к эмиссии выбросов токсичных веществ с отработавшими газами (ОГ) дизельных ДВС. Возможности современных высокоэкономичных дизельных двигателей по снижению токсичности ОГ за счет усовершенствования рабочего процесса достигли своего предела. В связи с этим повышается актуальность развития систем, обеспечивающих улавливание дизельных частиц в выпускной системе двигателя, эффективность которых достигает 85...95% [1, 2].

Как правило, системы улавливания дизельных частиц состоят из сажевого фильтра (СФ) и системы регенерации накопленной в слое фильтрующего элемента (ФЭ) сажи.

Термическая регенерация ФЭ фильтра, установленного в выпускной системе современного дизельного автомобиля, путем окисления уловленных частиц сажи, не возможна в диапазоне эксплуатационных режимов работы двигателя без подвода дополнительной внешней тепловой энергии. Применение катализаторов позволяет снизить температуры воспламенения и горения дизельной сажи и приблизить режим регенерации к диапазону температур ОГ при работе дизеля на режимах частичной нагрузки. Но при этом не всегда наблюдается устойчивый процесс регенерации, что приводит к недостаточной очистке СФ от накопленных сажевых частиц.

Методы термической регенерации реализуются при помощи устройств, повышающих темпера-

туру ФЭ до границы термического воспламенения сажи. Это, прежде всего, топливные дожигатели, электронагревательные элементы, СВЧ-генераторы. Повысить эффективное использование этих устройств можно в сочетании с прогрессивным в настоящее время методом регенерации СФ, реализующимся путем нанесения каталитического покрытия на осадительные поверхности ФЭ. Сочетание двух методов в условиях работы дизельного ДВС на пониженных нагрузках снизит энергопотребление, повысит надежность регенерации и долговечность ФЭ.

Авторегенерация ФЭ с каталитическим покрытием при работе дизеля на пониженных режимах может протекать вяло и медленно так, что скорость накопления дизельной сажи в ФЭ будет выше. Это приводит к недопустимому заполнению СФ, поэтому целесообразность применения термических методов регенерации, как дополнительных, видится в повышении интенсивности процесса выгорания дизельной сажи в момент значительной загрузки ФЭ. Необходимость включения в систему регенерации на этой основе дополнительного устройства зависит от режимов работы дизеля, эффективности применяемого каталитического покрытия и способа проведения регенерации.

Целью исследования в этой работе является выбор стратегии организации процесса регенерации путем анализа величины затрачиваемой мощности при выгорании дизельной сажи в теле фильтрующего элемента дизельных сажевых фильтров.

Термическое воспламенение сажевых частиц в структуре ФЭ осуществляется за счет остаточного кислорода, содержащегося в ОГ дизельного двигателя, при достижении температуры 550...600 °С. Количество энергии, которое необходимо подвести к ОГ, можно

определить из уравнения первого закона термодинамики для газового потока. Для теплового процесса, протекающего при постоянном давлении, подведенная теплота приведет к изменению энтальпии ОГ.

На основании исследований, проведенных фирмой Zeuna-Starker [3], температура ОГ, которую необходимо достичь, используя регенеративное устройство, составляет 700 °С. В качестве искомого энергетического показателя возьмем величину мощности, необходимую для нагрева потока ОГ до температуры 700 °С, которая рассчитывается по формуле:

$$P = G_{ог} C_p (700 - t), \text{ кВт}, \quad (1)$$

где  $G_{ог}$  – массовый расход ОГ, кг/с,

$$G_{ог} = \frac{G_t}{3600} (1 + 14,33\alpha);$$

$G_t$  – массовый расход топлива, кг/ч;

$\alpha$  – коэффициент избытка воздуха;

$C_p$  – средняя изобарная теплоемкость ОГ, кДж/(кг·К);

$t$  – температура ОГ, °С.

Мощность, необходимая для нагрева потока ОГ до температуры горения сажи на различных режимах работы двигателя 6Ч 12/14, определялась с использованием универсальных характеристик этого дизеля: зависимости  $t$ ,  $G_t$ ,  $\alpha$  от среднего эффективного давления ( $p_e$ ) и частоты вращения коленчатого вала ( $n$ ). По экспериментальным данным получены аппроксимированные зависимости в форме полных квадратичных уравнений с постоянными коэффициентами следующего вида:

$$y = a_{00} + a_{01}p_e + a_{11}p_e^2 + a_{02}n + a_{22}n^2 + a_{12}np_e. \quad (2)$$

Постоянные коэффициенты ( $a_{00}, \dots, a_{22}$ ) в уравнении (2) для каждой характеристики ( $t$ ,  $G_t$ ,  $\alpha$ ) представлены в таблице 1.

Таблица 1. Коэффициенты уравнения (2) для характеристик дизельного ДВС 6Ч 12/14

| № п/п | Характеристика у | Коэффициенты уравнений |          |          |          |                       |          |
|-------|------------------|------------------------|----------|----------|----------|-----------------------|----------|
|       |                  | $a_{00}$               | $a_{01}$ | $a_{11}$ | $a_{02}$ | $a_{22}$              | $a_{12}$ |
| 1     | $t$              | 122,904                | 63,926   | 1018,900 | -0,0757  | $6,327 \cdot 10^{-5}$ | 0,0590   |
| 2     | $G_t$            | 1,649                  | -7,289   | 20,817   | -0,0005  | $1,60 \cdot 10^{-6}$  | 0,0128   |
| 3     | $\alpha$         | 7,714                  | -25,620  | 18,390   | 0,0019   | $-1,60 \cdot 10^{-6}$ | 0,0039   |

Для построения изолиний мощности нагрева ОГ в координатах ( $p_e$ ,  $n$ ) задается поле температур ОГ ( $t$ ) из диапазона режимов работы дизеля, полученного в результате эксперимента, и рассчитывается среднее эффективное давление в диапазоне частот

вращения коленчатого вала для каждой выбранной температуры по формуле:

$$p_e = (2a_{11})^{-1} \left[ -(a_{01} + a_{12}n) + \sqrt{(a_{01} + a_{12}n)^2 - 4a_{11}(a_{00} + a_{02}n + a_{22}n^2 - t)} \right], \quad (3)$$

где  $p_e$  – среднее эффективное давление, МПа;

$a_{00}, a_{01}, \dots, a_{22}$  – постоянные коэффициенты для характеристики  $t$  (см. таблицу);

$n$  – частота вращения коленчатого вала дизеля,  $\text{мин}^{-1}$ .

Используя значения  $p_e$ , полученные по уравнению (3) в заданном температурном поле ОГ и диапазоне частот вращения коленчатого вала, определяются  $G_t$  и  $\alpha$  по аппроксимирующим зависимостям (2).

Для вычисления средней изобарной теплоемкости  $C_p$  используется уравнение, выраженное через коэффициент избытка воздуха  $\alpha$  [4]:

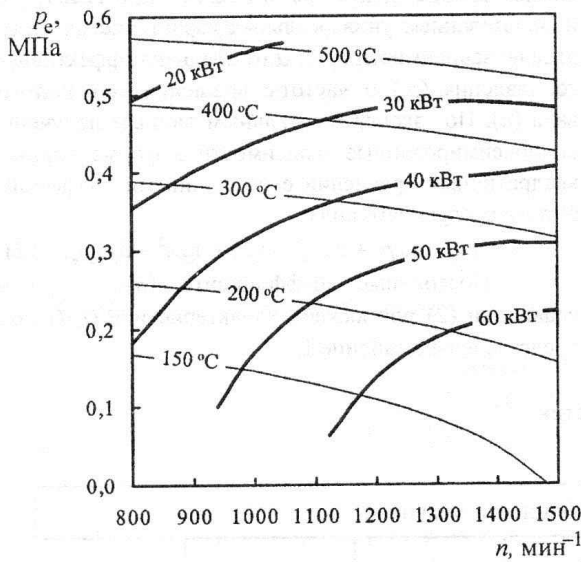
$$C_{p,l}^{700} = 4,18 \cdot \left[ \left( 6,72 + \frac{0,39}{\alpha} \right) + \left( 102 + \frac{44}{\alpha} \right) \cdot 10^{-5} T_{cp} \right], \quad (4)$$

где  $t$  – заданная изотерма поля температур ОГ, °C;

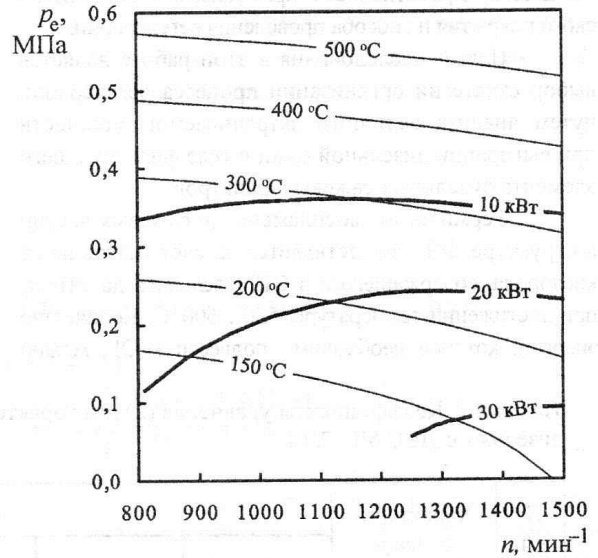
$T_{cp}$  – среднеарифметическая термодинамическая температура ОГ при нагреве в рассматриваемом диапазоне, К.

Построение изолиний мощности  $P$  осуществлялось интерполяцией ее значений по всему диапазону универсальных характеристик дизеля. В данном случае использовалась линейная интерполяция.

Результаты произведенных расчетов представлены на рис. 1, из которого видно, что для диапазона температур 200...400 °C и расхода 210...400 кг/ч ОГ мощность, которую нужно затрачивать на нагрев полного потока ОГ для термического выгорания дизельной сажи (рис. 1, а), колеблется в пределах 20...60 кВт, без учета тепловых потерь. При использовании электрических нагревателей для подвода такой мощности невозможно будет осуществлять термическую регенерацию в процессе движения транспортного средства. В этом случае регенерация проводится при останове транспортного средства или стационарно с использованием промышленной электросети в качестве источника энергии, что является само по себе существенным недостатком.



а)



б)

Рис. 1. Температура ОГ дизеля 6Ч 12/14 ( $t$ ) и мощность ( $P$ ), требуемая для нагрева ОГ в период регенерации СФ, по универсальной характеристике:  
а – нагрев ОГ до 700 °C; б – нагрев ОГ до 400 °C

Применение топливных дожигателей для полнопоточной термической регенерации ФЭ СФ в процессе движения транспортного средства возможно, но в этом случае существенно увеличивается удельный расход топлива на единицу мощности дизельного ДВС и повышается экологическая нагрузка

вследствие образования дополнительных выбросов токсичных веществ.

Температурный режим надежной регенерации для ФЭ с каталитическим покрытием составляет 300...400 °C. При длительной работе двигателя на режимах частичной нагрузки и холостого хода выго-

вание накопленной сажи в ФЭ не происходит вследствие низких температур ОГ. В этом случае, по заполнению ФЭ, нужно проводить принудительную (экстренную) регенерацию.

Для обеспечения экстренной регенерации такого ФЭ температура ОГ доводится до уровня, соответствующего каталитическому выгоранию сажи, тем или иным способом, при этом мощность, затрачиваемая на прогрев газов до 400 °С, составит 25...0 кВт (рис. 1, б).

Применение СВЧ-генератора в качестве регенеративного устройства облегчает процесс прогрева дизельной сажи до температуры ее горения, это объясняется избирательностью подвода энергии микроволн к частицам сажи при использовании в качестве фильтрующего материала на основе карбида кремния. Однако система регенерации существенно усложняется, и вопрос об общих затратах энергии при использовании этого способа регенерации требует отдельного рассмотрения.

Снизить мощность, затрачиваемую на регенерацию, можно путем уменьшения объема потока ОГ, проходящего через ФЭ. Частичный поток ОГ может быть заменен эквивалентным количеством вторичного воздуха. Прогрев сравнительно небольших расходов ОГ или воздуха до требуемых температур в этом случае обеспечивается возможностями автотранспортного средства. Необходимую мощность можно получить с помощью генератора или аккумулятора, размещенного на борту автомобиля (мощность порядка 2,5 кВт). Использование частичного потока ОГ или воздуха реализуется перепуском ОГ в момент регенерации мимо фильтра. Или, в случае использования конструкции с двумя параллельно расположенными фильтрами, основной поток ОГ идет через рабочий фильтр, а оставшая часть потока, предназначенная для регенерации, направляется на регенерируемый фильтр.

При такой организации регенерации время, затрачиваемое на весь процесс: прогрев и выгорание сажи, существенно увеличится по сравнению с полнопоточной регенерацией. Здесь на первый план выступает масса ФЭ и его теплофизические свойства. Такая стратегия пригодна для дизелей малой мощности, где фильтрующий элемент имеет небольшие габариты и массу, что крайне важно при его прогреве до температуры регенерации. Положительной стороной этого способа регенерации является то, что утилизацию накопленной сажи можно осуществлять непосредственно на борту автомобиля при его передвижении.

Обобщая вышеизложенное, следует отметить, что полнопоточную термическую регенерацию

СФ целесообразно использовать на стационарных дизельных установках, например дизельных генераторах, где нет необходимости в дорогостоящей системе регенерации. Период между регенерациями ФЭ может быть довольно длительным, а необходимая мощность может быть взята непосредственно от дизеля.

Для каталитической полнопоточной регенерации можно использовать дополнительные регенеративные устройства для подогрева ОГ, но только в качестве источника тепловой энергии небольшой мощности, которую можно получить непосредственно на борту автомобиля. В этом случае главными критериями выступают небольшие габариты, простота и надежность дополнительного устройства. По сути, здесь дополнительный источник энергии необходим для экстренной регенерации, для которой работа дизельного двигателя выводится на режимы, благоприятные для регенерации, а источник теплоты выступает в роли ускорителя каталитической реакции.

Регенерация сажевого фильтра с каталитическим покрытием или без него с помощью потока вторичного воздуха или частичного потока ОГ позволяет существенно снизить мощность регенеративной установки, дает возможность осуществлять регенерацию непосредственно при передвижении автотранспортного средства.

Следует отметить, что современные разработки в области снижения эмиссии дизельных частиц в сочетании с современными конструкциями двигателей [5] направлены на выбор способа организации регенерации и подбор каталитического покрытия, которое удовлетворяло бы условию авторегенерации, заключающемуся в поддержании скорости выгорания сажи хотя бы на уровне скорости ее накопления в структуре ФЭ (в этом случае противодавление будет величиной постоянной).

Таким образом, выполненный анализ показал, что для обеспечения термической регенерации СФ путем подогрева полного потока ОГ до необходимых температур требуется подвод тепловой энергии большой мощности, что не всегда возможно в условиях автотранспортного средства. Снижение мощности путем неполнопоточной регенерации увеличивает продолжительность регенерации, а в некоторых случаях может привести к неполной регенерации СФ вследствие прекращения процесса выгорания дизельной сажи.

#### Список литературы:

1. Mayer A. VERT: Selection Criteria For Diesel Particulate Trap Systems // DieselNet Technical reports. —