

Хрипач Николай Анатольевич

канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой

Лежнев Лев Юрьевич

канд. техн. наук, начальник НТЦ «Силовые агрегаты»

Папкин Борис Аркадьевич

канд. техн. наук, заместитель начальника НТЦ «Силовые агрегаты»

Иванов Денис Алексеевич

ведущий инженер НТЦ «Силовые агрегаты»

ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет»

г. Москва

DOI 10.21661/R-473416

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ТЕРМОАКУСТИЧЕСКОГО МОДУЛЯ СИСТЕМЫ ВЫПУСКА
ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ АВТОМОБИЛЯ**

Аннотация: в работе представлены результаты экспериментальных исследований термоакустического модуля автомобильного двигателя, полученные на различных нагрузочно-скоростных режимах работы двигателя. Термоакустический модуль предназначен для снижения шума выпуска отработавших газов за счет реализации термоакустического эффекта при охлаждении отработавших газов. Рекуперация тепловой энергии отработавших газов используется снижения времени прогрева двигателя после холодного пуска и повышения топливной экономичности на этом режиме работы. Результаты экспериментальных исследований термоакустического модуля представлены комплексом параметров, к которым относятся снижение шума выпуска отработавших газов по сравнению с базовой системой выпуска, аэродинамическое сопротивление теплообменника, входящего в состав термоакустического модуля, со стороны отработавших газов, гидравлическое сопротивление межтрубного пространства теплообменника со стороны охлаждающей жидкости и другие параметры.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, отработавшие газы, термоакустический модуль, экспериментальные исследования, шум выпуска отработавших газов, температура, давление.

Одной из важных проблем современных мегаполисов является акустическое загрязнение окружающей среды. Необходимость снижения шума, производимого транспортными средствами, обусловлена многими факторами, среди которых негативное воздействие на здоровье человека. Шум, создаваемый транспортными средствами, оказывает наибольшее влияние на общий уровень акустического загрязнения и составляет до 60% [1].

В последнее время все большее распространение получает перспективный способ снижения шума, в основу которого заложен термоакустический эффект, согласно которому при снижении температуры отработавших газов (ОГ) уменьшается звуковое давление акустических волн. Для этого используется термоакустический модуль автомобильного двигателя (ТАМАД), размещенный в системе выпуска ОГ и содержащий охладитель ОГ. Установлено, что применение ТАМАД позволяет снизить шум примерно на 2 дБ при охлаждении ОГ на 100°C [2].

Использование ТАМАД является одним из современных методов снижения шума выпуска ОГ и позволяет выполнить требования перспективных норм по снижению шума до 71 дБА и ниже (согласно Приложению III Регламента (ЕС) №540/2014 «Предельные значения») без значительного увеличения противодавления выхлопной системы.

В охладителе ОГ для интенсификации теплообмена и увеличения площади теплообменной поверхности применить элементы из пористого металла. Перспективность такого решения подтверждается проведенными работами по изучению теплообмена между потоком теплоносителя и ПМ [3].

Тепловая мощность, передаваемая охладителю при охлаждении ОГ, рассеивается с помощью системы охлаждения ДВС и при необходимости может использоваться для ускорения прогрева двигателя и снижения расхода топлива. Установлено, что холодный пуск ДВС при температуре 0°C приводит к повышению расхода топлива на 13,5% [4]. При температуре моторного масла около 20°C

потери на трение в двигателе более чем в 2,5 раза превышают этот показатель для прогретого моторного масла [5]. Также снижение времени прогрева позволяет сократить выбросы вредных веществ с ОГ в первые минуты после холодного пуска двигателя [6].

Во время экспериментальных исследований ТАМАД определено влияние нагрузочно-скоростных режимов работы ДВС на его основные показатели, среди которых снижение уровня шума выпуска ОГ по сравнению с базовой системой выпуска, аэродинамическое сопротивление теплообменника, входящего в состав термоакустического модуля, со стороны ОГ, гидравлическое сопротивление межтрубного пространства теплообменника со стороны охлаждающей жидкости (ОЖ) и другие параметры.

В ходе экспериментальных исследований также определено сокращение времени выхода двигателя на рабочий температурный режим и снижение расхода топлива на режиме прогрева двигателя, что оказалось возможным за счет использования ТАМАД. Полученные данные позволили рассчитать тепловую мощность, отводимую в ТАМАД от ОГ двигателя, и тепловую мощность, передаваемую в ТАМАД охлаждающей жидкости.

Экспериментальные исследования модуля проводились при следующих условиях: нагрузка на ДВС от 10 до 100%; частота вращения коленчатого вала ДВС от 850 до 4600 мин⁻¹; температура ОЖ на входе в макет более 80°C; расход ОЖ через макет от 0,5 до 1 кг/с.

ТАМАД имеет разъемную конструкцию и состоит из корпусных элементов и трехсекционного кожухотрубного теплообменника с последовательным расположением секций, который используется для охлаждения ОГ. В трубном пространстве теплообменника движется поток ОГ, а в межтрубном пространстве циркулирует ОЖ. Внутри теплообменных труб расположены теплообменные элементы из пористого металла, используемые для интенсификации теплообмена и увеличения площади теплообменной поверхности.

На рисунке 1 показан трехмерный эскиз ТАМАД, поясняющий используемые конструктивные и компоновочные решения.

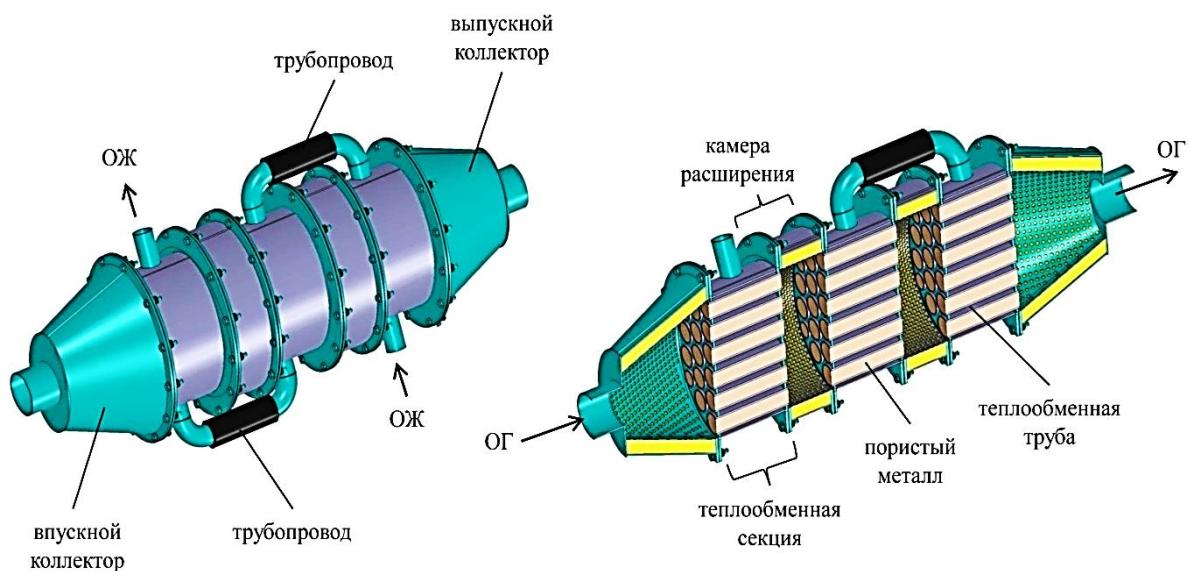


Рис. 1. Трехмерный эскиз ТАМАД

Результаты

В разделе приведены основные результаты экспериментальных исследований и анализ полученных данных.

1. Снижение уровня шума выпуска ОГ по сравнению с базовой системой выпуска.

Снижение уровня шума ОГ, обеспечиваемое при использовании ТАМАД, определялось при сравнении с характеристикой базовой системой выпуска ОГ автомобиля. На рисунке 2 показан график со значениями, полученными на используемых режимах работы ДВС и при расходе ОЖ 1 кг/с.

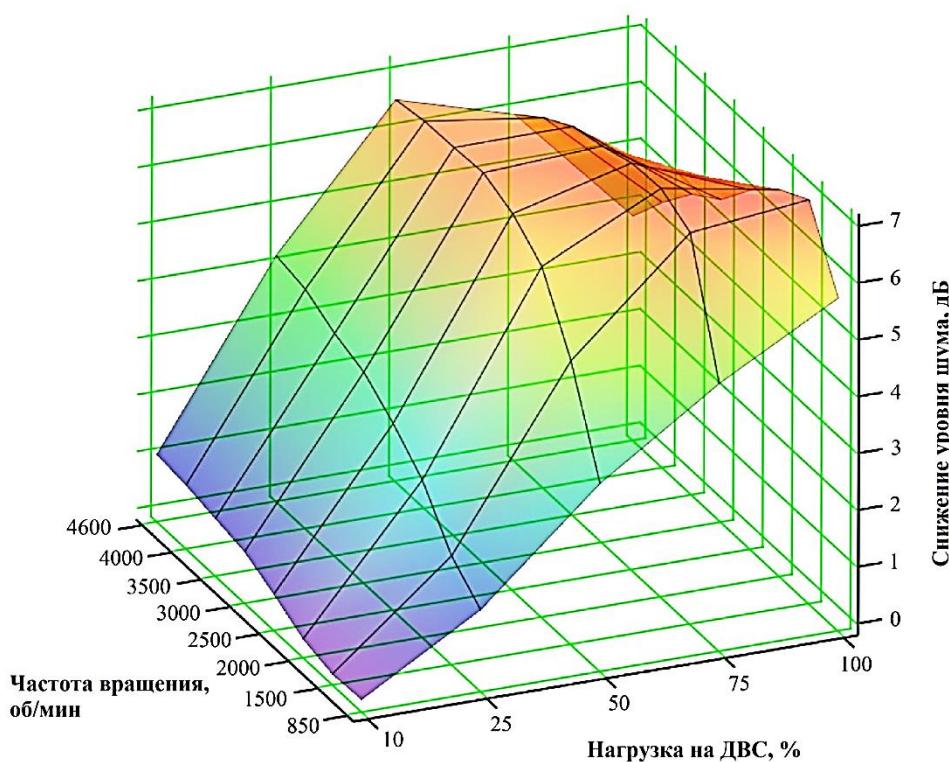


Рис. 2. Зависимость величины снижения уровня шума ОГ от режимов работы ДВС

Полученные результаты показывают низкую эффективность макета в части снижения шума выпуска ОГ при нагрузке на ДВС от 10 до 15% и во всем диапазоне частоты вращения, когда снижение уровня шума не превышает 2 дБ. Однако возможности стандартной системы выпуска ОГ с запасом обеспечивают выполнение норм по уровню шума на этих режимах, что позволяет считать работу ТАМАД на этом режиме неприоритетной.

Наибольшая эффективность ТАМАД достигается при работе ДВС на 3000 до 4600 мин⁻¹ на средних нагрузках, что связано с высокой эффективностью теплообменника в этом диапазоне. Такая характеристика ТАМАД позволит компенсировать недостатки традиционных глушителей реактивного действия, применяемых в автомобильных системах выпуска. Отметим достаточную эффективность ТАМАД при нагрузке на ДВС от 20 до 40% и во всем диапазоне частоты вращения.

Таким образом, целесообразно применение ТАМАД в условиях, преобладающих во время городского ездового цикла, что позволит снизить акустическое

загрязнение городской среды со стороны автомобильного транспорта с поршневыми ДВС.

2. Аэродинамическое сопротивление ТАМАД со стороны ОГ.

Аэродинамическое сопротивление определялось по разнице показаний датчиков давления ОГ, расположенных на входе и выходе из макета. На рисунке 3 приведен график зависимости аэродинамического сопротивления макета от нагрузочно-скоростных режимов работы ДВС.

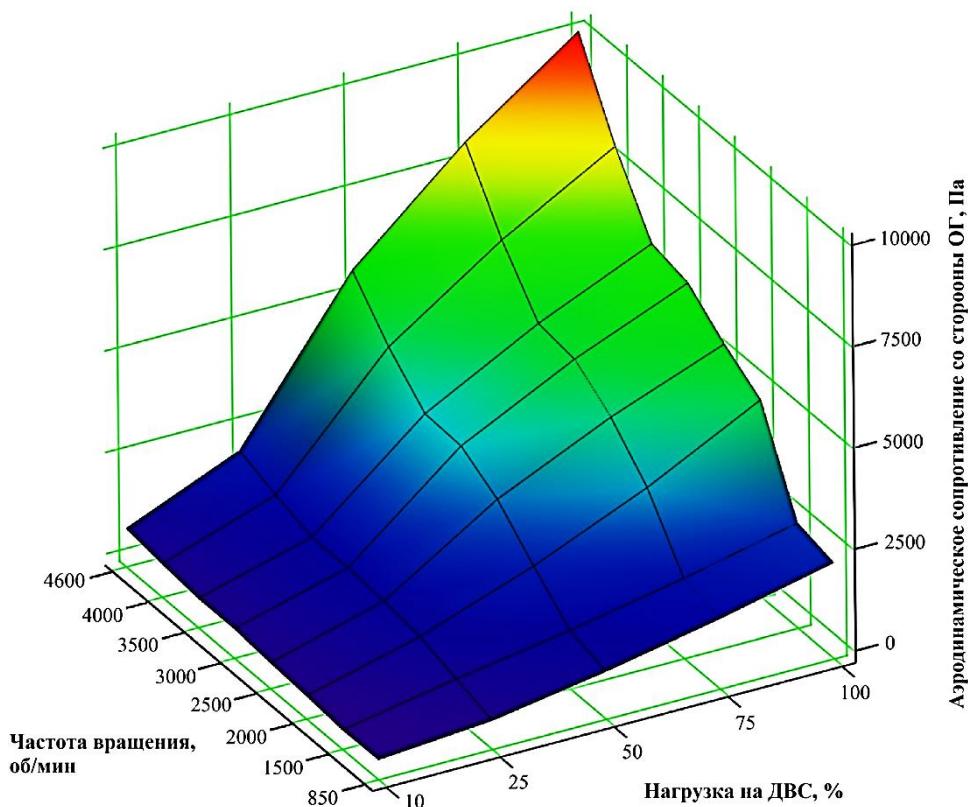


Рис. 3. График зависимости аэродинамического сопротивления от нагрузочно-скоростных режимов работы ДВС

Полученные значения аэродинамического сопротивления следует считать достаточно высокими и необходимо применение мер, направленных на снижение этой величины.

Одним из решений является сокращение объема используемого пористого металла, когда внутренний объем нескольких теплообменных труб не будет заполняться пористым металлом.

3. Гидравлическое сопротивление макета со стороны ОЖ.

Гидравлическое сопротивление определялось по разнице показаний датчиков давления ОЖ, установленных на входе и выходе из охлаждающей магистрали ТАМАД. На рисунке 4 показан график зависимости гидравлического сопротивления модуля от расхода ОЖ, составленный для различных режимов работы ДВС.

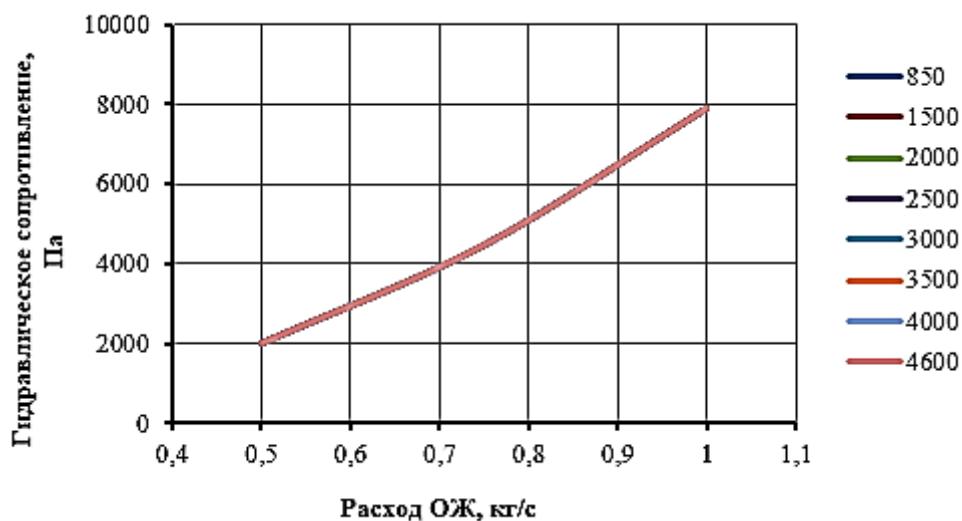


Рис. 4. График зависимости гидравлического сопротивления от расхода ОЖ

Полученные результаты показывают, что гидравлическое сопротивление макета не превышает 8000 Па и находится на удовлетворительном уровне. Также установлено, что изменение температуры ОЖ не оказывает заметного влияния на величину гидравлического сопротивления.

4. Тепловая мощность, отводимая в ТАМАД от ОГ двигателя, и тепловая мощность, передаваемая в ТАМАД охлаждающей жидкости.

Передача тепловой мощности от горячих ОГ к ОЖ происходит последовательно в 2 этапа. Сначала происходит передача теплоты $N_{ог}$ теплообменным трубам, а затем передача теплоты $N_{ож}$ от труб охлаждающей жидкости. Разница между $N_{ог}$ и $N_{ож}$ позволяет судить об эффективности теплообменника ТАМАД.

Значения тепловой мощности определяются с использованием массового расхода и удельной теплоемкости теплоносителя и перепада его температур на входе и выходе из ТАМАД.

Полученные результаты показывают, что тепловая мощность Ног больше значений Нож и разница составляет до 10%. Это связано с тепловыми потерями, возникающими во время теплообмена.

5. Эффективные показатели ДВС, улучшаемые при использовании ТАМАД.

Данные показатели представлены временем выхода двигателя на рабочий температурный режим Δt и снижением расхода топлива на режиме прогрева двигателя ΔGt . Во время исследований температура ОЖ, при которой ДВС считается прогретым, принята равной 60 °C, а расход ОЖ через теплообменный аппарат макета составил 0,5 кг/с.

Исследования по определению Δt и ΔGt проводились в 2 этапа: без использования ТАМАД и с его использованием. В первом варианте значения Δt и ΔGt составили соответственно 319 с и 1,17 кг/ч, а во втором – 275 с и 1,1 кг/ч соответственно. Таким образом, использование ТАМАД позволило достичь снижения времени выхода двигателя на рабочий температурный режим на 13,8%. Применение ТАМАД обеспечило снижение расхода топлива на режиме прогрева двигателя на 6,43%. Заметим, что результатом снижения ΔGt на этом режиме работы ДВС является повышение общей экономичности двигателя, которая пропорционально возрастает с увеличением количества холодных пусков.

Выходы

Полученные результаты предназначены для разработки алгоритмов работы ТАМАД, оптимизации его конструкции и проведения работ по доработке его конструкции. Экспериментальные данные могут быть использованы для доработки расчетной математической модели, например, в части расчета теплообменных процессов в пористом металле.

Настоящая работа подготовлена в рамках соглашения №14.574.21.0144 от 26 сентября 2017 года о предоставлении субсидии при финансовой поддержке Минобрнауки России. Уникальный идентификатор работ (проекта) – RFMEFI57417X0144.

Список литературы

1. Khripach N.A. Comparative analysis of EG noise suppression systems / N.A. Khripach, L.Y. Lezhnev, V.A. Neverov, D.A. Ivanov, B.A. Papkin // International Journal of Civil Engineering and Technology. – 2017. – №8 (10). – P. 1536–1553.
2. Milani E. Reduction of Exhaust Noise by Means of Thermal Acoustics / E. Milani, C. Paze, M. Ambrosino, P. Pagliano // SAE Int. J. Passeng. Cars – Mech. Syst. – 2012. – №5 (2). – P. 956–961.
3. Calmidi V.V. Forced Convection in High Porosity Metal Foams. J. Heat Transf. / V.V. Calmidi, R.L. Mahajan. – 2000. – №122. –P. 557–565.
4. Samhaber C. Modeling of engine warm-up with integration of vehicle and engine cycle simulation / C. Samhaber, A. Wimmer, E. Loibner // SAE technical paper. – 2001. – 2001-01-1697.
5. Will F. Fuel conservation and emission reduction through novel waste heat recovery for internal combustion engines. Fuel 2012. – P. 247–55.
6. Korin E. Reducing cold-start emission from internal combustion engines by means of a catalytic converter embedded in a phase-change material. Proc. Inst. Mech. Eng. Part D: J. Automob. Eng. / E. Korin, R. Reshef, D. Tshernichovesky, E. Sher. – 1999. – №213 (6). – P. 575–83.