

Соглашение о предоставлении субсидии № 14.574.21.0144 от 26 сентября 2017 г. Тема проекта: Разработка научно-технических решений и создание термоакустического модуля для снижения акустического воздействия автомобильного двигателя внутреннего сгорания на окружающую среду.

В результате проведения прикладных научных исследований на этапе 2 по Соглашению о предоставлении субсидии от «26» сентября 2017 г. № 14.574.21.0144 по теме «Разработка научно-технических решений и создание термоакустического модуля для снижения акустического воздействия автомобильного двигателя внутреннего сгорания на окружающую среду» получены следующие научно-технические результаты:

1. Изготовлен макет термоакустического модуля автомобильного двигателя, который состоит из следующих основных компонентов:

- корпус, состоящий из различных корпусных элементов;
- теплообменный аппарат;
- экранирующие элементы.

Макет термоакустического модуля изготовлен в полном соответствии с ЭКД, разработанной на этапе 1 выполняемых ПНИ.

2. Изготовлена экспериментальная установка, предназначенная для проведения исследований ТАМАД с целью измерения его характеристик для подтверждения требований ТЗ (Приложение №1 к Дополнительному соглашению №1 от «26» апреля 2018 года к Соглашению о предоставлении субсидии от 26 сентября 2017 года № 14.574.21.0144).

ЭУ изготовлена в соответствии с ЭКД, состоящей из схемы комбинированной принципиальной и схемы комбинированной соединений, чертежа общего вида, сборочного чертежа, рабочих чертежей деталей и эксплуатационной документации, содержащей инструкцию по эксплуатации и формуляр.

Изготовленная ЭУ состоит из следующих основных компонентов и систем:

- автомобильный двигатель, используемый в качестве источника ОГ с различными расходно-температурными характеристиками;
- элементы крепления СВОГ, устанавливаемые на полу испытательного бокса;
- система охлаждения, которая обеспечивает функционирование ДВС и ТАМАД в рабочем температурном режиме за счет рассеивания тепловой энергии, поступающей от двигателя и макета;
- программно-аппаратный комплекс, используемый во время проведения исследований ТАМАД для управления параметрами ЭУ и макета, сбора и обработки экспериментальных данных.

3. Разработан программно-аппаратный комплекс по управлению экспериментальной установкой, состоящий из следующих компонентов:

- контроллер управления ЭУ с установленным ПО для обработки информации с контрольно-измерительных датчиков и формирования сигналов управления исполнительными механизмами систем, входящих в состав ЭУ;
- контрольно-измерительные датчики систем ЭУ, среди которых датчики давления и температуры ОГ и ОЖ, расположенные на входе и выходе из ТАМАД в соответствующих точках, ультразвуковые датчики расходомера ОЖ, и измеритель расхода воздуха, поступающего в ДВС;
- система коммутации контроллера с датчиками и исполнительными механизмами систем ЭУ.

ПАК по управлению ЭУ обеспечивает выполнение ряда функций, среди которых получение постоянного массива данных по измеряемым параметрам, задание и поддержание в автоматическом режиме необходимых расходов теплоносителей, проходящих через ТАМАД. А также расчет режимов работы ТАМАД в соответствии с информацией от контрольно-измерительных датчиков и выбор необходимых параметров управления исполнительными механизмами систем ЭУ и ТАМАД в соответствии с действующим режимом работы.

4. Разработано программное обеспечение программно-аппаратного

комплекса по управлению экспериментальной установкой, которое включает в свой состав графический интерфейс пользователя, предназначенный для ввода и визуального контроля параметров управления ЭУ и ТАМАД.

ПО разработано в соответствии с программной документацией, включающей в себя:

- ТЗ на разработку ПО в соответствии с ГОСТ 19.201-78;
- описание применения в соответствии с ГОСТ 19.502-78;
- описание программы в соответствии с ГОСТ 19.402-78;
- руководство оператора в соответствии с ГОСТ 19.505-79.

5. Изготовлен программно-аппаратный комплекс по управлению экспериментальной установкой, для чего была разработана ЭКД для изготовления программно-аппаратного комплекса, состоящая из:

- схем электрической принципиальной, подключения и соединений (монтажной схемы), выполненных в соответствии с ГОСТ 2.702-2011;
- чертежа общего вида и сборочного чертежа, выполненных в соответствии с ГОСТ 2.109-73.

Представлено описание изготовления ПАК по управлению экспериментальной установкой на основании ранее разработанной эскизной конструкторской документации. В том числе представлен перечень компонентов ПАК и их размещение в готовом устройстве.

6. Представлено описание основных работ, проводимых во время монтажа на экспериментальной установке макета термоакустического модуля автомобильного двигателя и программно-аппаратного комплекса по управлению экспериментальной установкой

7. Разработана программа и методики контрольных испытаний программно-аппаратного комплекса по управлению экспериментальной установкой, предназначенная для проверки правильности функционирования узлов ПАК по получению данных от датчиков и управлению исполнительными устройствами, для этого были разработаны необходимые испытания ПАК.

Проверка осуществляется по всему тракту преобразования: от датчика, измеряющего физические величины и до отображения измеренных величин в программном интерфейсе оператора. Аналогичный принцип использован для проверки исполнительных устройств экспериментальной установки.

8. В результате проведения контрольных испытаний программно-аппаратного комплекса по управлению экспериментальной установкой определена работоспособность основных узлов ПАК для сбора информации и управления исполнительными устройствами, входящими в состав экспериментальной установки для проведения экспериментальных исследований макета ТАМАД.

9. Разработана программа и методики 14.574.21.0144 ПМ2 исследований макета термоакустического модуля автомобильного двигателя, которая включает в себя общие положения и общие требования к условиям, обеспечению и проведению исследований. В программе и методиках представлены требования безопасности, которые необходимо выполнять во время проведения исследований и работ, связанных с обслуживанием объекта исследований и ЭУ. Программа и методики содержит программу исследований и описание режимов и методов проведения исследований, а также перечень используемых средств проведения исследований.

10. Во время исследований макета термоакустического модуля автомобильного двигателя на различных нагрузочно-скоростных режимах работы ДВС были определены основные показатели макета:

- уровень шума ОГ по сравнению с базовой системой выпуска автомобиля;
- перепад температур и давления ОГ на входе и выходе из макета;
- перепад температур и давления ОЖ на входе и выходе из макета;
- средняя температура внешней поверхности корпуса макета;
- тепловая мощность, отводимая в макете от ОГ двигателя;
- тепловая мощность, передаваемая ОЖ в макете.

В результате этого использование макета ТАМАД в составе базовой СВОГ позволило достичь максимального снижения шума по сравнению с

базовой СВОГ, равное 21,3 дБА, а среднее значение снижения шума при использовании макета ТАМАД составило 16,4 дБА, что соответствует требованиям пункта 4.2.2 ТЗ (Приложение №1 к Дополнительному соглашению №1 от «26» апреля 2018 года к Соглашению о предоставлении субсидии от 26 сентября 2017 года № 14.574.21.0144).

В ходе исследований проведена количественная оценка влияния использования макета ТАМАД на снижение времени выхода ДВС на рабочий температурный режим, которое составило 13,68%, что соответствует требованиям пункта 4.2.2 ТЗ (Приложение №1 к Дополнительному соглашению №1 от «26» апреля 2018 года к Соглашению о предоставлении субсидии от 26 сентября 2017 года № 14.574.21.0144).

В результате исследований макета ТАМАД определена недостаточная равномерность распределения потока перед первой теплообменной секцией теплообменника (протокол № 5 от 21 июня 2018 года), что указывает на необходимость доработки макета ТАМАД для создания оптимальных условий работы теплообменника согласно требованиям пункта № 4.3.1 ТЗ (Приложение № 1 к Дополнительному соглашению №1 от «26» апреля 2018 года к Соглашению о предоставлении субсидии от «26» сентября 2017 года № 14.574.21.0144).

Полученные результаты исследования макета ТАМАД показали, что на номинальном режиме работы ДВС ($L = 100\%$; $n = 4500 \text{ мин}^{-1}$) аэродинамическое сопротивление увеличивается до 9283 Па (протокол № 7 от 13 июля 2018 года), что не соответствует установленному номинальному значению - не более 8000 Па и превышает общее аэродинамическое сопротивление резонатора и глушителя, входящих в состав базовой системы выпуска ОГ, которое на этом режиме составляет 9061,4 Па, что было установлено в результате испытаний на термометрирование базовой системы выпуска ОГ поршневого автомобильного двигателя (протокол № 13 от 18 декабря 2017 г.), проведенного в ходе выполнения работ на этапе №1 в рамках Соглашения о предоставлении субсидии от 26 сентября 2017 года № 14.574.21.0144.

Результаты исследования аэродинамического сопротивления макета ТАМАД со стороны ОГ также указывают на необходимость доработки для выполнения требований пункта № 4.3.1 ТЗ (Приложение № 1 к Дополнительному соглашению №1 от «26» апреля 2018 года к Соглашению о предоставлении субсидии от «26» сентября 2017 года № 14.574.21.0144).

11. По результатам исследований макета ТАМАД выполнена доработка макета термоакустического модуля автомобильного двигателя. Изменения, внесенные в конструкцию макета ТАМАД, внесены в эскизную конструкторскую документацию на доработанный макет ТАМАД и представлены в акте доработки макета термоакустического модуля автомобильного двигателя по результатам исследований. Доработка макета ТАМАД направлена на устранение конструктивных недостатков некоторых компонентов макета и отклонений в работе макета от расчетных значений.

12. Разработана программа и методики 14.574.21.0144 ПМЗ испытаний доработанного макета термоакустического модуля автомобильного двигателя, которая включает в себя общие положения и общие требования к условиям, обеспечению и проведению испытаний.

В программе и методиках представлены требования безопасности, которые необходимо выполнять во время проведения испытаний и работ, связанных с обслуживанием объекта исследований и ЭУ. Программа и методики содержит программу испытаний, описание режимов и методов проведения исследований и перечень используемых средств проведения испытаний.

13. Проведение испытаний доработанного макета термоакустического модуля автомобильного двигателя

Во время испытаний доработанного макета термоакустического модуля автомобильного двигателя на различных нагрузочно-скоростных режимах работы ДВС были определены основные показатели макета:

- снижение уровня шума ОГ по сравнению с базовой системой выпуска автомобиля;
- аэродинамическое сопротивление макета ТАМАД со стороны ОГ.

В результате испытаний также изучена вибростойкость фланцевых резьбовых соединений, исследовано влияния вибрации на состояние шумоизоляционного материала, используемого в доработанном макете ТАМАД, и на расположение распределителя потока ОГ, и получены следующие результаты:

1) полученные значения перепада давления воздуха до и после проведения виброиспытаний, которые составили соответственно 2049,7 Па и 2087,4 Па, соответствуют предельному отклонению не более 10%.

2) снижение момента затяжки фланцевых резьбовых соединений в конце испытаний на вибростенде составило менее 5% от начального значения, что не превышает предельное отклонение;

3) подтверждено отсутствие нарушения прилегания элементов из звукопоглощающего материала к внутренним перфорированным стенкам макета, дефекты в звукопоглощающем материале не выявлены;

4) измеренное расстояние вдоль центральной оси между внешней поверхностью первого присоединительного фланца впускного коллектора и внешней поверхностью распределителя составило 176,4 мм, что укладывается в установленное предельное отклонение ± 2 мм при номинальном значении 176 мм.

Проведенное испытание вибростойкости макета термоакустического модуля автомобильного двигателя подтверждает его соответствие требованиям пункта 4.1.1 ТЗ в части использования в составе двигателей автомобильных транспортных средств (Приложение №1 к Дополнительному соглашению №1 от «26» апреля 2018 года к Соглашению о предоставлении субсидии от 26 сентября 2017 года № 14.574.21.0144).

В итоге использование доработанного макета ТАМАД в составе базовой СВОГ позволило достичь максимального снижения шума по сравнению с базовой СВОГ, равное ≈ 19 дБА. Среднее значение снижения шума при использовании доработанного макета ТАМАД составило 13 дБА, что соответствует требованиям пункта 4.2.2 ТЗ (Приложение №1 к

Дополнительному соглашению №1 от «26» апреля 2018 года к Соглашению о предоставлении субсидии от 26 сентября 2017 года № 14.574.21.0144).

В ходе испытаний проведена количественная оценка влияния использования доработанного макета ТАМАД на снижение времени выхода ДВС на рабочий температурный режим, которое составило 12,85%, что соответствует требованиям пункта 4.2.2 ТЗ (Приложение №1 к Дополнительному соглашению №1 от «26» апреля 2018 года к Соглашению о предоставлении субсидии от 26 сентября 2017 года № 14.574.21.0144).

Также в ходе испытаний установлено, что применение доработанного макета ТАМАД обеспечило снижение расхода топлива на режиме прогрева двигателя на 5,84%, что стало возможным за счет уменьшения насосных потерь в ДВС благодаря снижению аэродинамического сопротивления теплообменного аппарата в доработанном макете ТАМАД.

В результате испытаний доработанного макета ТАМАД достигнута равномерность распределения потока ОГ, которая способна создать оптимальные условия работы теплообменника в доработанном макете ТАМАД согласно требованиям пункта № 4.3.1 ТЗ (Приложение № 1 к Дополнительному соглашению №1 от «26» апреля 2018 года к Соглашению о предоставлении субсидии от «26» сентября 2017 года № 14.574.21.0144).

В результате испытаний доработанного макета ТАМАД определено максимальное аэродинамическое сопротивление, которое составило 7396 Па, что не превышает установленное номинальное значение 8000 Па и соответствует требованиям пункта № 4.3.1 ТЗ (Приложение № 1 к Дополнительному соглашению №1 от «26» апреля 2018 года к Соглашению о предоставлении субсидии от «26» сентября 2017 года № 14.574.21.0144).

Установлено, что на снижение шума выпуска ОГ оказывают влияние нескольких факторов, действующих одновременно:

- реализация термоакустического эффекта за счет снижения температуры ОГ;
- поглощение энергии в элементах из ЗПМ, расположенных в камерах расширения, впускном и выпускном коллекторах;

- снижение энергии ОГ при прохождении потока через элементы из пористого металла, расположенные внутри теплообменных труб теплообменного аппарата.

14. В разработанном проекте технического задания на проведение ОКР по разработке опытного образца термоакустической системы снижения шума автомобильного двигателя представлены основные требования на разработку опытного образца термоакустической системы, предназначенной для снижения шума выпуска ОГ автомобильного двигателя.

15. В ходе выполнения работ на этапе 2 выполнена корректировка эксплуатационной документации на макет термоакустического модуля автомобильного двигателя. Основанием для корректировки эксплуатационной документации послужили результаты исследований и доработки, внесенные в конструкцию макета ТАМАД.

Скорректированная эксплуатационная документация на макет ТАМАД состоит из инструкции по эксплуатации 0144.065153.010-01 ИЭ и формуляра 0144.065153.010-01 ФО.

16. Разработаны рекомендации и предложения по разработке, производству и эксплуатации ТАМАД, выполненные с учетом технологических возможностей и особенностей индустриального партнера - организации реального сектора экономики.

Рекомендации и предложения направлены на использование полученных результатов ПНИ в целях их дальнейшего внедрения (промышленного освоения).

17. При проведении технико-экономической оценки результатов ПНИ в сравнении с современным научно-техническим уровнем определено значение полной окупаемости ТАМАД, которая достигается через 3,23 лет эксплуатации.

Ожидаемый интегральный эффект от реализации проекта по использованию ТАМАД в составе систем выпуска ОГ составляет 21,665 млн. руб. по истечении 10 лет, что подтверждает экономическую

целесообразность тиражирования устройств данного типа на автомобильных ТС.

18. Разработанный термоакустический модуль позволяет снизить шум выпуска ОГ до уровня действующих стандартов согласно требованиям Правил ЕЭК ООН №51-02 и ГОСТ Р 41.51-2004, способен обеспечить частичное функциональное замещение базового глушителя, а при комплексном подходе и глубокой интеграции ТАМАД в системы ДВС и ТС возможно выполнение перспективных стандартов по снижению общего уровня шума ТС.

19. В рамках работ по второму этапу подано 2 заявки для регистрации результатов интеллектуальной деятельности:

Заявка № 2018145976 от 25.12.2018 г. на полезную модель «Термоакустический глушитель автомобильного двигателя», РФ;

Заявка № 2018145979 от 25.12.2018 г. на полезную модель «Установка для охлаждения экспериментального оборудования», РФ.

20. Полученные научно-технические результаты отражены в докладах «Расчетные исследования охладителя отработавших газов системы выпуска автомобиля» на международной научно-практической конференции «Двигатели и компоненты транспортных средств: разработка и производство, эксплуатация и сервисное обслуживание» и «Экспериментальные исследования термоакустического модуля системы выпуска отработавших газов автомобиля» на международной научно-практической конференции «Наука, образование, общество: тенденции и перспективы развития».

Также полученные научно-технические результаты отражены в трех статьях: 1) Khripach, N.A., Lezhnev, L.Y., Ivanov, D.A., Shustrov, F.A., Tatarnikov, A.P. Design of a thermoacoustic module of a vehicle engine. International Journal of Mechanical Engineering and Technology, Volume 9, Issue 4, April 2018, Pages 1036-1046; 2) Nikolay Anatolyevich Khripach, Lev Yurievich Lezhnev, Denis Alekseevich Ivanov, Boris Arkadyevich Papkin and Viktor Sergeevich Korotkov. Computational analysis of the exhaust gas cooler of an automobile engine. International Journal of Pure and Applied Mathematics,

Volume 119, No. 15, 2018, 2627-2631, которые опубликованы в 2018 году в изданиях, индексируемых в базе данных Scopus. 3) Khripach, N. A., Lezhnev, L. Y., Ivanov, D. A., Neverov, V. A., Petrichenko, D. A., & Skvortsov, A. A. (2018). Experimental studies of thermoacoustic module of automobile engine. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 9(9), 1564-1571.

Таким образом, задачи прикладных научных исследований второго этапа и проекта в целом решены в полном объеме.

Сведения о ходе выполнения ПНИ в рамках Соглашения о предоставлении субсидии от «26» сентября 2017 г. № 14.574.21.0144 размещены на официальном сайте Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Московский политехнический университет" (Московский Политех) по ссылке <http://mospolytech.ru/index.php?id=2338>.

Прикладные научные исследования на этапе 2 по теме «Разработка научно-технических решений и создание термоакустического модуля для снижения акустического воздействия автомобильного двигателя внутреннего сгорания на окружающую среду» по Соглашению о предоставлении субсидии от «26» сентября 2017 г. № 14.574.21.0144 соответствуют ТЗ, плану-графику исполнения обязательств и выполнены в полном объеме в установленные сроки.