

РЕКУПЕРАЦИЯ ТЕПЛОТЫ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ДВИГАТЕЛЯ АВТОМОБИЛЯ

А.А. ДОЛГУШИН, кандидат технических наук, зав. кафедрой

Д.М. ВОРОНИН, доктор технических наук, профессор

Ю.А. ГУСЬКОВ, доктор технических наук, доцент

А.Ф. КУРНОСОВ, старший преподаватель (e-mail: anton_kurnosov@mail.ru)

Новосибирский государственный аграрный университет, ул. Добролюбова, 160, Новосибирск, 630039, Российская Федерация

Резюме. Существующие на сегодняшний день системы утилизации теплоты отработавших газов направлены на ее преобразование в иной вид энергии, сопровождающееся снижением эффективности предпринимаемых мер вследствие низкого коэффициента полезного действия предложенных конструкций. Разработанные средства, использующие теплоту отработавших газов для подогрева агрегатов и систем автомобилей, отличаются низкой степенью рекуперации теплоты, что сказывается на эффективности их работы в целом. Для повышения эффективности тепловой подготовки агрегатов и систем автомобиля путем использования теплоты отработавших газов становится актуальной и практически значимой разработка рекуператора высокой теплопроизводительности, способного решить такую техническую задачу при работе двигателя в режиме холостого хода. Исследования проводили с целью разработки рекуператора и экспериментального определения его мощности в условиях низкой температуры и скорости движения отработавших газов. На грузовой автомобиль КамАЗ-5320 была установлена экспериментальная установка, включающая предлагаемый глушитель-рекуператор, изготовленный на основе стандартного глушителя автомобиля указанной марки, жидкостный насос и расширительный бак, сообщающиеся между собой при помощи трубопроводов. Экспериментальную установку заполняли охлаждающей жидкостью (тосол марки А40). Измерительное оборудование включало в себя датчики температуры ТП.ХК(L)-К11 (второй класс допуска по ГОСТ 6616-94) и ДТС 034-50М (класс допуска В по ГОСТ 6651-2009) для регистрации температуры отработавших газов и промежуточного теплоносителя, соответственно. Для автоматической записи температуры использовали персональный компьютер (ПК) и программное обеспечение для осуществления связи ПК с приборами. Скорость движения отработавших газов измеряли при помощи термоанемометра DT-8894. Результаты экспериментального исследования подтверждают эффективность разработанного глушителя-рекуператора, максимальная теплопроизводительность которого при работе двигателя в режиме холостого хода составляет 6900 Вт.

Ключевые слова: глушитель-рекуператор, температура отработавших газов, промежуточный теплоноситель, температурный напор.

Для цитирования: Рекуперация теплоты отработавших газов двигателя автомобиля / А.А. Долгушин, Д.М. Воронин, Ю.А. Гуськов, А.Ф. Курносов // Достижения науки и техники АПК. 2016. Т.30. №8. С. 87-90.

Один из способов повышения эффективности эксплуатации автомобилей в условиях отрицательных температур – использование вторичной теплоты двигателя. Наиболее рациональным ее источником представляется теплота отработавших газов (ОГ), потенциал которой составляет до 35% теплоты топлива, сгоревшего в двигателе [1], а возможность рекуперации без влияния на тепловое состояние двигателя наступает сразу же после его пуска при работе в режиме холостого хода. Проведенный анализ существующих средств и способов использования тепловой энергии отработавших газов показал, что большинство предложенных решений направлено на преобразование теплоты ОГ в механическую или электрическую энергию. При этом сами же разработчики отмечают, что такое преобразование влечет за собой большие потери, снижающие эффективность предлагаемых мероприятий вследствие

низкого коэффициента полезного действия применяемых технических конструкций [2, 3].

Основная идея существующих устройств подогрева, использующих теплоту отработавших газов, заключается в непосредственном обдуве наружных поверхностей агрегатов и систем, что в значительной степени увеличивает время нагрева используемых смазочных материалов при передаче теплоты через теплоемкий корпус. Для агрегатов трансмиссий, оказывающих значительное влияние на снижение эффективности эксплуатации автомобилей в условиях отрицательных температур [4], подогрев актуален до принятия нагрузки или в первые минуты работы. В качестве источника теплоты в рассматриваемом случае М.М. Разяпов предлагал использовать отработавшие газы жидкостного подогревателя двигателя [5]. Однако потенциал такого источника не способен обеспечить комплексную тепловую подготовку всех агрегатов трансмиссии. Учитывая рекомендации заводов-изготовителей отечественных грузовых автомобилей по разогреву двигателей до температуры охлаждающей жидкости 40 °С в режиме холостого хода, представляется возможным использование теплоты отработавших газов в этот период для тепловой подготовки агрегатов трансмиссии до принятия ими нагрузки.

Разработанная ранее система подогрева [6] дает возможность определенным образом провести нагрев непосредственно масла механической коробки передач через промежуточный теплоноситель, однако низкая теплопроизводительность рекуператора не позволяет создать необходимый температурный напор для комплексного подогрева всех агрегатов трансмиссии. На основе изложенного можно сделать вывод, что проблема тепловой подготовки агрегатов трансмиссии достаточно актуальна, а ее решение требует совершенствования существующих систем подогрева, в первую очередь в части рекуперации теплоты ОГ при работе двигателя в режиме холостого хода.

Цель наших исследований заключалась в повышении эффективности рекуперации теплоты отработавших газов путем разработки глушителя-рекуператора высокой теплопроизводительности при работе двигателя в режиме холостого хода.

Для достижения поставленной цели решали следующие задачи:

определить температуру и скорость движения отработавших газов вдоль выпускного тракта при работе двигателя в режиме холостого хода;

разработать глушитель-рекуператор теплоты отработавших газов двигателя на основе стандартного глушителя автомобиля КамАЗ.

оценить теплопроизводительность рекуператора при работе двигателя в режиме холостого хода.

Условия, материалы и методы. Объектом исследования выступал процесс изменения температуры промежуточного теплоносителя глушителя-рекуператора в низкотемпературных условиях окружающей среды при работе двигателя в режиме холостого хода.

Экспериментальные исследования проводили в условиях лаборатории кафедры эксплуатации машинно-тракторного парка ФГБОУ ВО НГАУ. На автомобиль КамАЗ-5320 была установлена экспериментальная установка (рис. 1), основным элементом которой служит глушитель-рекуператор 1 (ГР), заменяющий штатный глушитель. Циркуляцию нагретой жидкости (промежуточ-

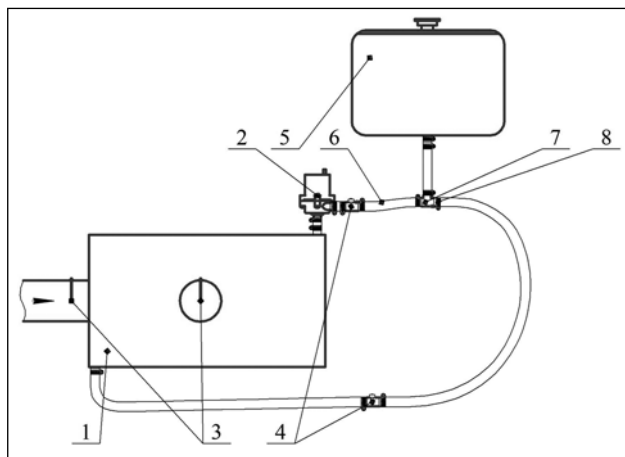


Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки.

ного теплоносителя) внутри рекуператора осуществляли при помощи жидкостного насоса 2, работающего от бортовой сети транспортного средства. Для контроля температуры отработавших газов и теплового состояния промежуточного теплоносителя на входе и выходе ГР были установлены датчики температуры 3 и 4, соответственно. С целью предотвращения возникновения повышенного давления жидкости в ГР предусмотрен расширительный бак 5. Указанные элементы соединяли между собой при помощи системы теплоизолированных жидкостных магистралей 6, тройника 7 и червячных хомутов 8.

Глушитель-рекуператор (рис. 2) представлял собой теплообменник типа «труба в трубе», состоящий из внутренней трубы 1 с отверстиями 2 для прохождения отработавших газов с внутренней стороны наружу трубы; внешней трубы 3, служащей кожухом для глушителя-рекуператора; трубок теплопередачи 4 для теплообмена между отработавшими

газами и промежуточным теплоносителем, жестко и герметично закрепленных между собой торцевыми фланцами 6 и 7 при помощи сварного соединения таким образом, что образованные полости между фланцами 5 и 6, 7 и 8 соединяют между собой внутренние полости трубок теплопередачи. Для подвода и отвода промежуточного теплоносителя предназначены входной 9 и выходной 11 штуцеры, для отвода отработавших газов – выпускной патрубок 10.

Стоит отметить, что в основу конструкции рекуператора был положен стандартный глушитель автомобиля КамАЗ-5320. Для сохранения сопротивления прохождению через глушитель отработавших газов, его принципиальная конструкция была сохранена.

Основой для выбора материала послужила теоретическая оценка теплопроводности различных металлов, широко используемых на рынке. Дополнительными условиями были стоимость, разнообразность сортамента металлопроката, пригодность материала к технологической обработке, стойкость к используемым теплоносителям. По совокупности перечисленных свойств выбрали металлопрокат из меди.

Глушитель-рекуператор работает следующим образом. Горячие отработавшие газы от двигателя входят в него через внутреннюю трубу 1, попадают в основную полость, ограниченную внешней трубой 3, омывают трубки теплопередачи, теряют скорость и теплоту и выходят из выпускного патрубка 10, что снижает интенсивность звука и температуру отработавших газов. В свою очередь, промежуточный теплоноситель движется в направлении от впускного штуцера 9 к выпускному 11, омывая с внутренней стороны трубки теплообмена и принимая тепло от отработавших газов. Нагретую жидкость можно использовать как для совершенствования систем подогрева [8, 9, 10], так и для подогрева двигателей и салонов автобусов и автомобилей.

Измерительное оборудование включало в себя датчики температуры ТП.ХК(L)-К11 (второй класс допуска по ГОСТ 6616-94) и ДТС 034-50М (класс допуска В по ГОСТ 6651-2009) для регистрации температуры отработавших газов и промежуточного теплоносителя соответственно. Обработку данных с датчиков и их запись происходила на персональном компьютере ступенчато, посредством преобразования в устройствах контроля УКТ 38, преобразователях АС-2 м и АС 4 научно-производственной фирмы «ОВЕН». Обработку полученных данных осуществляли в стандартном пакете приложений Microsoft Office Excel.

Скорость движения ОГ на входе в глушитель-рекуператор измеряли термоанемометром DT-8894, крыльчатку которого устанавливали соосно с трубой выпускной системы.

Экспериментальную установку заполняли низкозамерзающей охлаждающей жидкостью (тосол марки А 40) объемом 10 л. Пуск жидкостного насоса осуществляли одновременно с пуском двигателя. Опыт проводили до момента стабилизации температуры промежуточного теплоносителя. На протяжении экспериментальных исследований температура окружающей среды составляла минус 15 °С.

Для практического использования глушителя-рекуператора необходимо дополнительно оснастить указанную экспериментальную установку теплообменниками для передачи теплоты от промежуточного теплоносителя маслу подогреваемых агрегатов. Иными словами, системы подогрева, подробно описанные в литературных источниках [4, 6], модернизируются путем замены существующих рекуператоров на предлагаемый в статье ГР.

Результаты и обсуждение. Рекуперация теплоты отработавших газов при работе двигателя в режиме холосто-

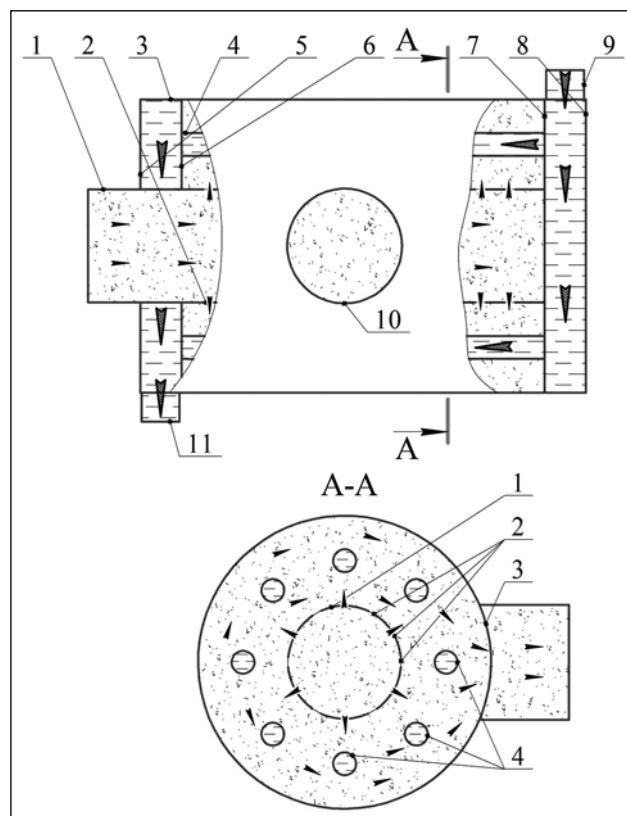


Рис. 2. Общий вид глушителя-рекуператора: □ – отработавшие газы; □ – промежуточный теплоноситель; ► – направление движения ПТ; ◄ – направление движения ОГ.

го хода ограничена ее возможной продолжительностью, сопровождается пониженной температурой и скоростью движения отработавших газов. Так как ГР устанавливали вместо штатного глушителя, существует вероятность охлаждения отработавших газов при прохождении вдоль выпускного тракта, что негативно скажется на эффективности рекуперации теплоты. Для создания необходимой температуры и скорости движения ОГ путем изменения частоты вращения коленчатого вала двигателя, были проведены вспомогательные исследования и установлена зависимость между величинами этих показателей (рис. 3).

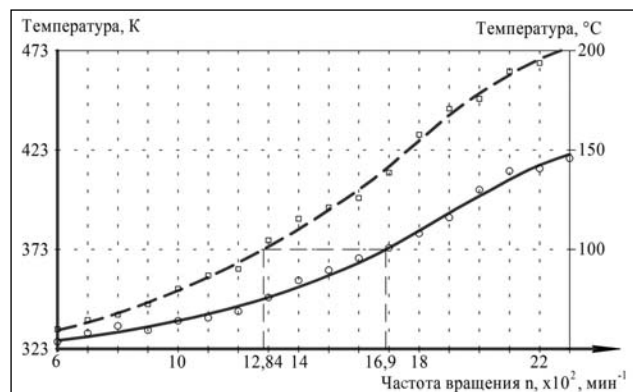


Рис. 3. Изменение температуры ОГ от частоты вращения коленчатого вала двигателя: — — — вход в ГР; — — — выход из ГР.

Ее анализ показывает, что увеличение частоты вращения коленчатого вала двигателя в режиме холостого хода приводит к значительному повышению температуры отработавших газов. Так, при частоте вращения коленчатого вала двигателя 600 мин^{-1} , температура ОГ на входе в рекуператор составила около 333 K (60°C), а при 2300 мин^{-1} — более 473 K (200°C). Учитывая, что предполагаемый максимальный температурный режим работы глушителя-рекуператора не должен превышать 353 K , или 80°C (это диктует необходимость нагрева агрегатов и систем до 333 K , или 60°C), следует установить скоростной режим работы двигателя в режиме холостого хода таким образом, чтобы температура отработавших газов позволила нагреть промежуточный теплоноситель до необходимой величины и одновременно не происходило его перегрева. Исходя из изложенного, частота вращения коленчатого вала двигателя должна составлять $1284\text{--}1690 \text{ мин}^{-1}$, что обеспечит среднюю температуру ОГ в рекуператоре на уровне 373 K (100°C). При этом верхняя граница частоты вращения коленчатого вала двигателя во время его прогрева в режиме холостого хода ограничена требованиями завода-изготовителя КамАЗ величиной 1500 мин^{-1} .

Исследование скорости движения вдоль выпускного тракта и расхода отработавших газов при изменении частоты вращения коленчатого вала двигателя показало их линейную зависимость (рис. 4). Повышение частоты вращения коленчатого вала двигателя с 600 до 1800 мин^{-1} приводило к увеличению скорости движения с 14 до 53 м/с , их часового расхода — с 55 до $1270 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Совместный анализ перечисленных зависимостей (см. рис. 3 и 4) свидетельствует, что увеличение частоты вращения коленчатого вала двигателя оказывает влияние на тепловой потенциал отработавших газов.

Заключительный этап экспериментальных исследований был посвящен изучению теплового состояния промежуточного теплоносителя при нагреве глушителем-рекуператором.

Мы установили достаточно высокую способность рекуператора повышать температуру промежуточного тепло-

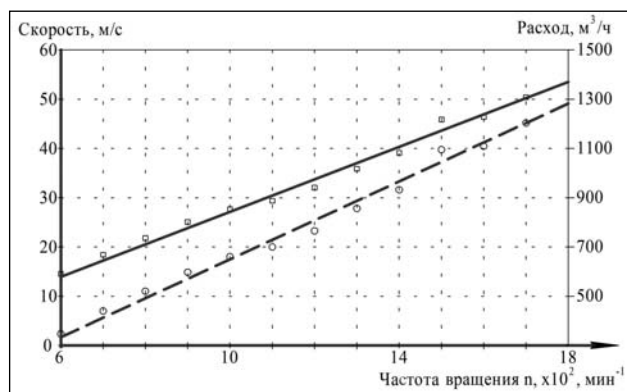


Рис. 4. Изменение скорости и расхода ОГ от частоты вращения коленчатого вала двигателя: — — — скорость ОГ, м/с; — — — расход ОГ, $\text{м}^3/\text{ч}$.

носителя. Например, при работе двигателя в режиме холостого хода с частотой вращения 1450 мин^{-1} , температура промежуточного теплоносителя (ПТ) стабилизировалась на уровне 358 K (85°C) за 25 мин работы (рис. 5), при этом большее ее изменение происходило в первые 10 мин работы экспериментальной установки, а за первые 6 мин температура теплоносителя и вовсе достигала срединного значения в 314 K (41°C). Таким образом, в первые минуты работы рекуператор обладает максимальной теплопередающей способностью, что вполне логично, учитывая наибольшую разность температур промежуточного теплоносителя и отработавших газов в начальный момент времени.

На основе показателей изменения температуры промежуточного теплоносителя от времени (см. рис. 5) расчетно-экспериментальным путем была установлена теплопроизводительность разработанного глушителя-рекуператора при прогреве ПТ (рис. 6). На максимальную производительность в 6900 Вт он выходит менее чем за 3 мин, дальнейшая работа рекуператора приводит к постепенному снижению передаваемого теплового потока вплоть до 120 Вт на 25 мин. Средний тепловой поток, переданный глушителем-рекуператором в рамках проведенных исследований составил 1860 Вт . При этом в первые 5 мин работы величина этого показателя была равна 4848 Вт , а температура промежуточного теплоносителя за это время увеличилась до 308 K (35°C). На основании совместного анализа результатов этого этапа исследований (см. рис. 5 и 6) можно сделать вывод, что в целях увеличения

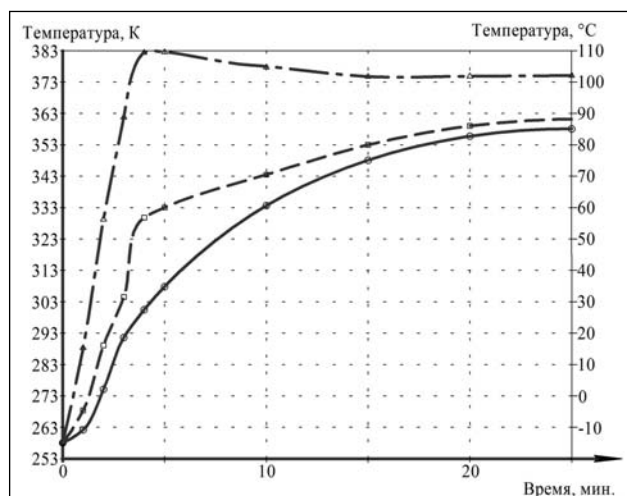


Рис. 5. Изменение температуры промежуточного теплоносителя от времени: — — — температура ОГ на входе в ГР; — — — температура ОГ на выходе из ГР; — — — средняя температура ПТ.

эффективности работы глушителя-рекуператора, отбор переданной им теплоты промежуточному теплоносителю необходимо начинать с первых секунд, что снизит интенсивность нарастания температуры промежуточного теплоносителя и сохранит температурный напор, оказывающий прямое влияние на теплопроизводительность ГР. Оценивая работу глушителя-рекуператора относительно отведенной от ОГ теплоты за 25 мин можно сказать, что 2790 кДж для подогрева объема масла в картерах агрегатов трансмиссии автомобиля КамАЗ от минус 30°С до 0°С вполне достаточно.

1. Гуревич А.М. Тракторы и автомобили. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Колос, 1983. 336 с.
2. Коваленко Ю. Ф. Повышение эффективности двигателей внутреннего сгорания за счет утилизации теплоты их отработавших газов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Барнаул, 2003. 17 с.
3. Яркин А. В. Повышение эффективности строительных мобильных машин путем утилизации тепла отработавших газов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Тюмень, 2005. 19 с.
4. Курносов А.Ф. Подогрев механической коробки передач транспортных средств сельскохозяйственного назначения в условиях Сибири: дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2016. 148 с.
5. Разяпов М.М. Повышение работоспособности агрегатов трансмиссии автотракторной техники в условиях низких температур: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2013. 16с.
6. Долгушин А.А., Курносов А.Ф. Подогрев транспортных средств // Сельский механизатор. 2013. №2. С. 38–39.
7. А. с. 1586923 СССР, МКИ В 60 Н 1/18. Отопительное устройство для транспортного средства / А.В. Кирейцев, Б.П. Потенко. № 4474398/25-11; заявл. 15.08.88; опубл. 23.08.90, Бюл. № 31.
8. Пат. № 2394994 РФ, МПК F01 P7/00. Объединенная система охлаждения двигателя внутреннего сгорания и гидрообъемной трансмиссии / Н.И. Селиванов, А.В. Кузнецов, Н.В. Кузмин. № 2009112907; заявл. 06.04.2009; опубл. 20.07.2010, Бюл. № 20.
9. А. с. 1588673 СССР, МКИ В 60 Н 1/18. Устройство для отопления кабины транспортного средства / В.П. Хохлаков, В.В. Кузнецов. № 4377505/27-11; заявл. 15.02.88; опубл. 30.08.90, Бюл. № 32.
10. Пат. № 2488015 РФ, МПК F 02N19/00. Система поддержания оптимального теплового режима двигателя внутреннего сгорания / Н.И. Селиванов, А.В. Кузнецов, С.А. Зыков, А.М. Шестов. № 2012111633/06; заявл. 26.03.2012; опубл. 20.07.2013, Бюл. № 20.

Summary. Currently existing system of utilization of exhaust gas heat directed on its transformation into another kind of energy, accompanied by a decrease in the efficiency of the adopted measures due to the low efficiency factor of the offered tools. Developed tools, which use the exhaust gas heat for heating the aggregates and systems of machines, have a low ability to heat recuperation, which affects their performance in general. To improve the efficiency of thermal preparation of aggregates and vehicle systems through the use of exhaust gas heat the development of recuperator with high thermal performance becomes urgent and practically significant. It should be able to solve such technical problem when the engine is idling. Studies were carried out to develop a recuperator and to determine experimentally its capacity under conditions of low temperature and speed of exhaust gases. On the truck KAMAZ-5320 a test unit was installed, including the proposed silencer-recuperator, made on the basis of the standard muffler of cars of this brand, liquid pump and an expansion tank, interconnected through pipelines. The experimental setup was filled with coolant antifreeze brand A40. Measuring equipment included temperature sensors TP.HK(L)-K11 the second class of tolerance according to GOST 6616-94 and DTS 034-50M B-class of tolerance according to GOST 6651-2009 to record the temperature of the exhaust gas and intermediate heat-transfer agent, respectively. For automatic registration of temperature it was used a personal computer (PC) and software to implement PC communication with instruments of research and production company "OWEN". The speed of movement of exhaust gases was measured by thermo-anemometer DT-8894. Obtained experimental results confirm the efficiency of the developed silencer-recuperator: the maximum capacity is 6900 Watts when the engine is idling.

For citation: Dolgushin A.A., Voronin D.M., Guskov Y.A., Karnosov A.F. Recuperation of Heat from Exhaust Gases of Car Engine. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*. 2016. V.30. No. 8. Pp. 87-90 (in Russ.).

Выводы. При работе двигателя в режиме холостого хода температура отработавших газов при движении вдоль выпускного тракта варьирует от 333 К (60 °С) до 476 К (203 °С) в случае изменения частоты вращения коленчатого вала двигателя с 600 до 2300 мин⁻¹. Увеличение частоты вращения коленчатого вала с 600 до 1800 мин⁻¹ приводит к росту скорости движения отработавших газов вдоль выпускного тракта с 14 до 53 м/с. Оптимальный диапазон частоты вращения коленчатого вала двигателя для рекуперации теплоты в рассматриваемых условиях с учетом требований завода изготовителя по продолжительности и режиму его прогрева составит 1284-1500 мин⁻¹.

Максимальная производительность разработанного глушителя-рекуператора составила 6900 Вт после 3 мин работы при частоте вращения коленчатого вала двигателя 1450 мин⁻¹. Средний тепловой поток, переданный глушителем-рекуператором промежуточному теплоносителю в рамках проведенных исследований был равен 1860 Вт, при этом в первые 5 мин его работы средний передаваемый тепловой поток составил 4848 Вт, чего вполне достаточно для тепловой подготовки агрегатов механической трансмиссии автомобиля КамАЗ.