

УДК 621.113

А.А. Пикулькин¹, Л.А. Бердников¹, М.Г. Корчажкин¹, Л.А. Захаров¹, П.И. Бажан²**ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЫШЕНИЯ ТЕРМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ
ИЗОЛЯЦИИ ЦЕНТРАЛЬНОГО КОРПУСА ТУРБОКОМПРЕССОРА
АВТОМОБИЛЬНЫХ ДВС**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
Центр разработки Правил в структуре
Верхне-Волжского филиала Российского Речного Регистра²

Рассмотрено применение тепловых экранов для снижения теплопередачи на центральный корпус турбокомпрессора от отработавших газов. Предложены способы повышения термического сопротивления тепловых экранов. Представлен вариант доработки корпуса турбинной части турбокомпрессора для обеспечения эффективности теплового экрана. Представлен перечень основных параметров турбокомпрессора и указаны их допустимые пределы для безотказной работы. Проанализированы наиболее неблагоприятные эксплуатационные режимы работы двигателя и турбокомпрессора, ведущие к отказам.

Ключевые слова: турбокомпрессор, тепловой экран, термическое сопротивление, критический режим, температура масла, узел подшипников, надежность, безотказность, холодный пуск.

Объектом исследования являются турбокомпрессоры радиального типа (ТКР) как для дизельных, так и для искровых ДВС. Обобщение объекта исследования объясняется аналогичной конструкцией рассматриваемых частей турбокомпрессора и одним принципом работы узлов. Поэтому рассматриваемые вопросы, и выработанные в дальнейшем технические меры актуальны для большей части ТКР, несмотря на широкое разнообразие моделей турбокомпрессоров, независимо от размеров или производителя. Наиболее распространенный способ теплового изолирования центрального корпуса – применение тепловых экранов, которые имеют наибольшее значение в снижении теплопередачи на центральный корпус от отработавших газов и сопряженных частей корпуса турбины.

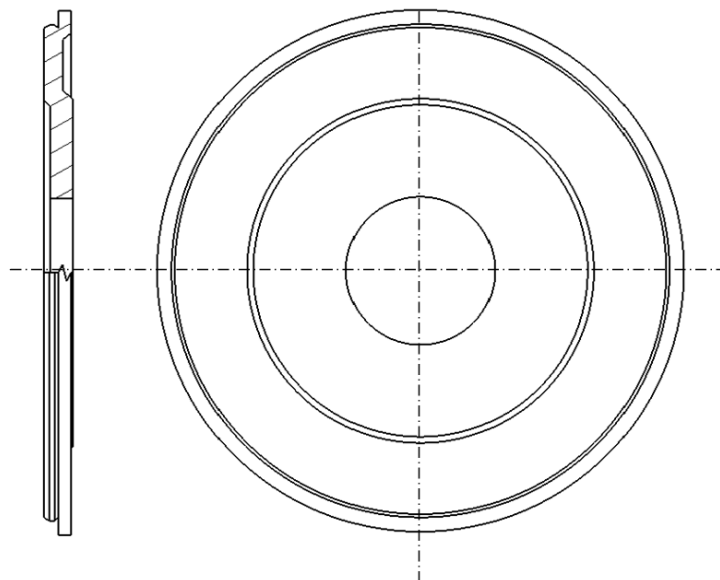


Рис. 1. Тепловой экран турбокомпрессора ТКР 7Н-2А

В данной статье предлагается конструкция теплового экрана со значительно повышенным термическим сопротивлением, применяемая в турбокомпрессорах, изначально пред-

полагающих простую - практически плоскую форму такого экрана, примером могут служить широко применяемые модификации турбокомпрессоров ТКР-7.

За геометрическую основу построения новой конструкции взят тепловой экран турбокомпрессора ТКР 7Н-2А.

Новый экран должен иметь аналогичные размеры, но обладать большим термическим сопротивлением. Исходный экран выполнен из чугуна с коэффициентом теплопроводности λ около 50 Вт/м·К, что свидетельствует о малом термическом сопротивлении слоя, которое равно отношению толщины слоя к коэффициенту теплопроводности материала слоя: $R_C = \frac{s}{\lambda}$.

В конструкции нового экрана использован широко применимый в технике метод – использование газовой (воздушной, $\lambda=0,03...0,05$ при температурах 100...500 °С соответственно) прослойки, причем в предлагаемом варианте внутренняя полость сообщается с окружающим воздухом для обеспечения возможности течения воздуха внутри экрана. Предлагаемая конструкция такого экрана представлена на рис. 2.

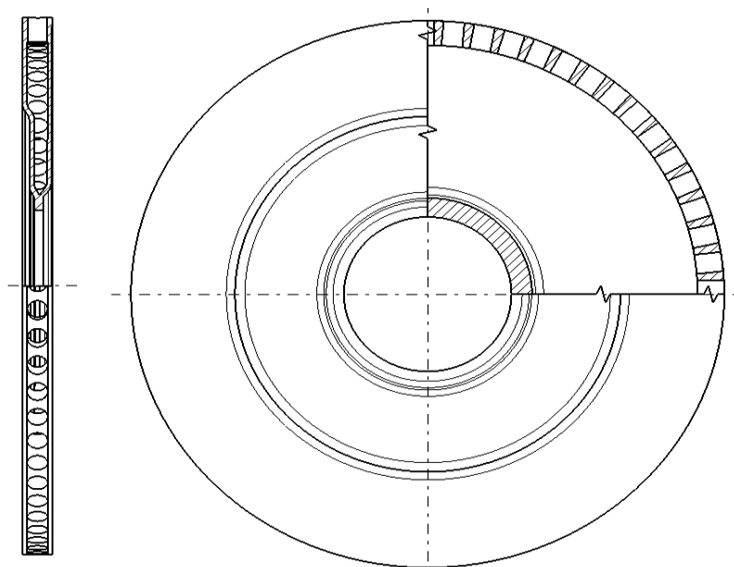


Рис. 2. Пример теплового экрана турбокомпрессора с повышенным термосопротивлением

Тепловой экран вкладывается в проточку в корпусе-улитке турбинной части и прижимается вместе с центральным корпусом шестью болтами со специальными пластинами. Применение данного экрана требует незначительных изменений корпуса турбинной части, а именно: в промежутках между крепежными болтами обеспечивается открытие торцевой части теплового экрана для движения воздуха (рис. 3).

Эксплуатационные методы не предполагают значительного изменения в конструкции эксплуатируемого объекта, а влияние на процессы технического состояния объекта обеспечивается путем применения эксплуатационных материалов с иными характеристиками, изменения периодичности и содержания технического обслуживания, учет конкретных условий эксплуатации, обеспечение необходимых условий стоянки, хранения, исключения неблагоприятных режимов работы.

Таким образом, эксплуатационные меры предполагают оптимизацию внешних воздействий на турбокомпрессор. Точкой отсчета в данном аспекте надежности является ресурс агрегата при идеальных условиях обслуживания и эксплуатации.

Многие применяемые эксплуатационные меры широко известны и не нуждаются в представлении в данной работе (обеспечение работы ДВС без нагрузки перед остановкой, своевременная замена моторного масла и использование масла соответствующего качества, контроль за состоянием воздушного фильтра, воздухопроводов и т.д.)



Рис. 3. Изменения в корпусе турбинной части ТКР 7 для обеспечения эффективности теплового экрана

Любой ТКР работает в строго определенной совокупности диапазонов параметров; выход за допустимые пределы одного или нескольких ведет либо к необратимым негативным изменениям в агрегате, либо сразу к его отказу. Таким образом, путем исключения таких режимов работы возможно значительно продлить ресурс турбокомпрессора.

Можно выделить два основных вида способов исключения критических режимов работы. К первому относится измерение параметров и сигнализирование о выходе за допустимые пределы. В данном случае все непосредственные решения принимаются водителем или другими лицами. Другой случай – автоматизация коррекции параметров путем обработки системой управления полученных данных. Второй способ ввиду развития и широкого распространения электронных систем управления применяется на большинстве современных автомобилей.

Для ТКР, главным образом, имеют значение следующие параметры:

- 1) давление масла на входе в ТКР;
- 2) температура масла на входе в ТКР;
- 3) температура отработавших газов на входе в ТКР;
- 4) давление во входном патрубке (за воздушным фильтром);
- 5) давление воздуха в нагнетательной магистрали.

Параметр 4 изменяется со степенью загрязнения воздушного фильтра, и его своевременная замена обеспечивает поддержание давления в норме. Снижение пропускной способности фильтра, как и уменьшение давления в нагнетательной магистрали (параметр 5), может вызвать значительное увеличение частоты вращения ротора вплоть до величин, вызывающих выход из строя ТКР. Кроме того, данные неисправности ухудшают характеристики ДВС.

Температура отработавших газов на входе в ТКР (параметр 3), кроме режима работы двигателя, зависит от типа ДВС, особенностей конструкции и настройки, степени форсирования. Данные особенности учтены при подборе ТКР к двигателю, но изменение температуры ОГ может быть вызвано также и некачественным топливом, изменением угла опережения впрыска или зажигания, нарушением фаз газораспределения. Как показывают исследования, данный параметр напрямую влияет на температуру, как ротора, так и корпуса подшипников. Поэтому значение температуры выхлопных газов крайне важно с точки зрения надежности турбокомпрессора.

Параметры 1 и 2 также зависят от конструкции и состояния двигателя, а также состояния маслоподающей магистрали. Давлением масла определяется расход масла через

данный турбокомпрессор. Расход непосредственно влияет на интенсивность охлаждения деталей ТКР, а также на повышение температуры масла в связи с передачей тепла. Температура масла на входе также определяет интенсивность теплообмена, непосредственно влияет на температуру масла в подшипниках, таким образом, обуславливая условия трения. Поэтому параметры 1 и 2 имеют большое значение в обеспечении продолжительной работы ТКР. Следует отметить, что в совокупности параметры 1, 2, 3 влияют также на сроки службы масла, ускоряя или замедляя процессы разрушения присадок и окисления масла.

Таким образом, имея информацию о величине параметров 1–6, а также определив их допустимые диапазоны, возможно исключить неблагоприятные для турбокомпрессора режимы работы при эксплуатации. Определение допустимых параметров – отдельная задача, исходными данными в которой являются характеристики ДВС и ТКР, применяемые масла и т.д.

С целью упрощения контроля над тепловым состоянием ТКР, имеется возможность объединить параметры 1 – 3. В данном случае речь идет о температуре масла на стоке из ТКР. На этот параметр влияет как температура масла на входе, давление (расход) масла, так и температура газов в ТКР. Температура масла на сливе - наиболее общий параметр, точно характеризующий тепловое состояние подшипникового узла и турбокомпрессора в целом.

Измерение температуры масла в сливной магистрали турбокомпрессора возможно обеспечить путем внедрения в нее температурного датчика, необходимо учесть, что трубка магистрали не заполнена маслом полностью, поэтому следует предусмотреть специальную нишу для скопления масла, стекающего по стенкам, что обеспечивает необходимые условия для получения верных значений температуры, что показано на рис. 4.

Данные о температуре могут быть использованы для отображения указателем, сигнальной лампой с заданным температурным порогом включения, блоком управления для автоматической корректировки нагрузки на ДВС и т.д.

Таким образом, появляется возможность контроля превышения температуры масла допустимых значений. Это особенно актуально для двигателей грузовых автомобилей и тракторов, так как при их эксплуатации силовой агрегат продолжительное время работает на режимах максимальной мощности. Например, турбодизель трактора или карьерного самосвала может работать на режимах, близких к максимальной мощности в течение долгого времени, необходимого для преодоления расстояния гона на пахоте либо подъема. Этого времени достаточно для полного разогрева как всех деталей силовой установки, так и масла, оказывает при этом негативное влияние на надежность и долговечность ТКР, что подтверждается результатами анализа отказов в эксплуатации.

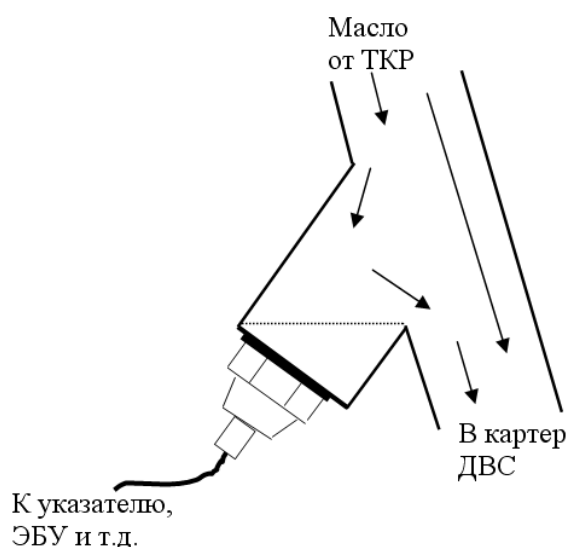


Рис. 4. Схема установки датчика температуры масла в сливную магистраль ТКР

Одним из наиболее неблагоприятных эксплуатационных режимов работы автомобиль-

ного двигателя, оказывающих влияние на надежность и долговечность узла подшипников ТКР, является режим пуска, особенно при отрицательных температурах. В этих условиях имеет место значительная задержка поступления масла к подшипникам турбокомпрессора, обусловленная как гидравлическим сопротивлением трубопроводов как на линии всасывания, так и на линии нагнетания. Недостаточное количество масла приводит к изменению гидродинамических условий работы подшипников ТКР, создавая предпосылки для отказа. Как правило, турбокомпрессор является наиболее удаленной от насоса точкой смазки (рис. 5). Это обстоятельство должно учитываться при организации подачи масла к агрегату.

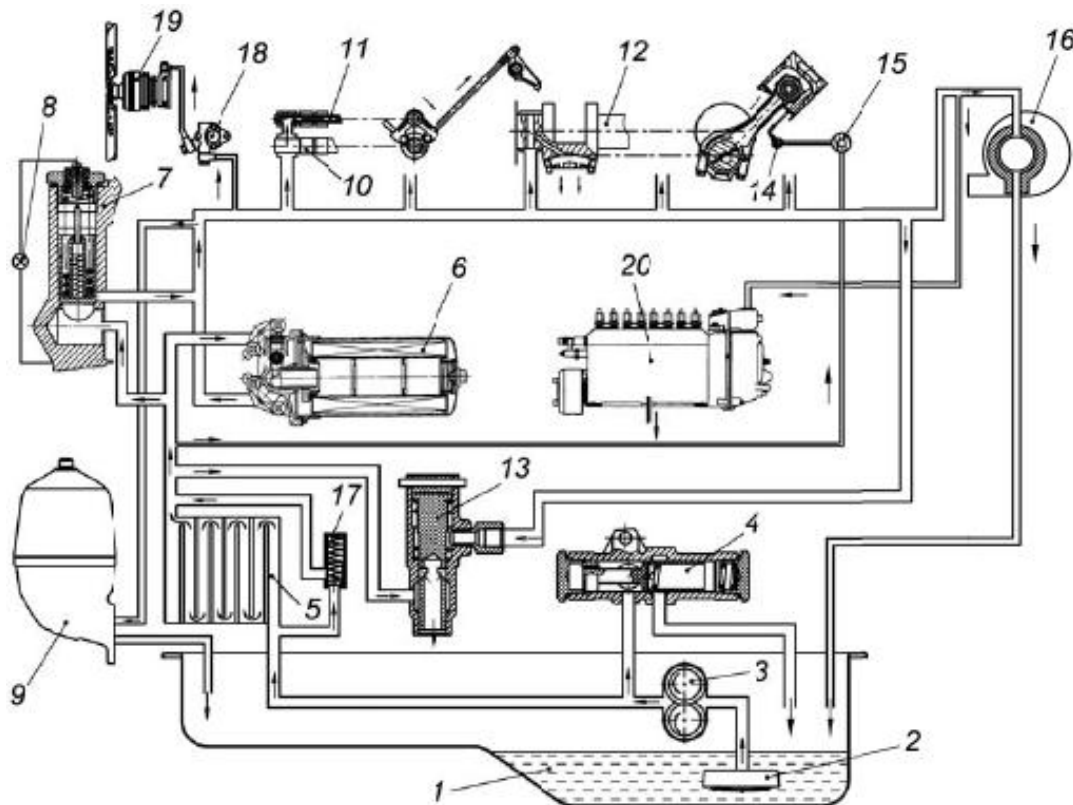


Рис. 5. Схема системы смазки двигателя ЯМЗ с односекционным масляным насосом и жидкостно-масляным теплообменником:

1 – масляный картер; 2 – маслозаборник; 3 – масляный насос; 4 – редукционный клапан;
 5 – жидкостно-масляный теплообменник; 6 – фильтр очистки масла; 7 – перепускной клапан;
 8 – сигнальная лампа фильтра; 9 – фильтр центробежной очистки масла; 10 – распределительный вал;
 11 – ось толкателей; 12 – коленчатый вал; 13 – дифференциальный клапан; 14 – форсунка охлаждения поршней;
 15 – клапан системы охлаждения поршней; 16 – турбокомпрессор; 17 – перепускной клапан теплообменника;
 18 – включатель привода вентилятора; 19 – привод вентилятора; 20 – ТНВД

Как показывают испытания двигателя ЯМЗ 238 и ТКР, при температуре $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ при пуске и работе на холостом ходу с частотой вращения 1400–1500 об/мин, нарастание давления масла в турбокомпрессоре происходит через 0,5–2 мин после запуска в зависимости от характеристик и состояния масляного фильтра; подача масла в магистраль в место отбора на ТКР происходила в среднем через 16 с с момента пуска. Учитывая повышенную нагрузку на двигатель в таких условиях, по сравнению с работой на холостых оборотах прогретого ДВС, создаются условия для ускоренного износа подшипников ТКР с дальнейшим развитием негативных последствий. При этом увеличение диаметров маслоподводящих каналов уменьшает гидравлическое сопротивление, но увеличивает время на их заполнение.

Недостаточная подача масла при достаточно высокой частоте вращения ротора приводит к потере устойчивости масляного слоя в узле подшипников. Это усугубляется

почти полным отсутствием демпфирования в масляном слое, в результате чего отмечается мгновенное возрастание амплитуды прецессионного движения конца вала ротора и уменьшение частоты его вращения. В этот момент на подшипники ТКР передаются обусловленные значительным уменьшением вязкости масла из-за возрастания температуры дополнительные нагрузки из-за большой амплитуды прецессирования ротора. Эти нагрузки приводят к контактированию поверхностей трения. При осмотре деталей узла подшипников было отмечено засветление участков контакта.

При длительном контактировании поверхностей появляются натир, а в случае наличия в масле абразивных частиц – риски. Последовательное накопление натиров и рисков приводит к качественным изменениям в работе сопряженных поверхностей узла подшипников и, в конечном итоге, к возникновению задиров и последующему отказу подшипников ТКР. Приведенная физическая модель отказа подтверждается материалами эксплуатации и проведенных стендовых испытаний.

Неблагоприятные обстоятельства, сопутствующие холодному пуску, учтены в рекомендациях для эксплуатации двигателей зарубежных фирм: Каминс, Катерпиллер, Скания и др. Например, на двигателях Скания ограничен верхний предел частоты вращения в течение 30 с после пуска, и составляет 1000 об/мин. Фирмы Каминс и Катерпиллер не допускают резкого повышения частоты вращения коленчатого вала двигателя в период после пуска.

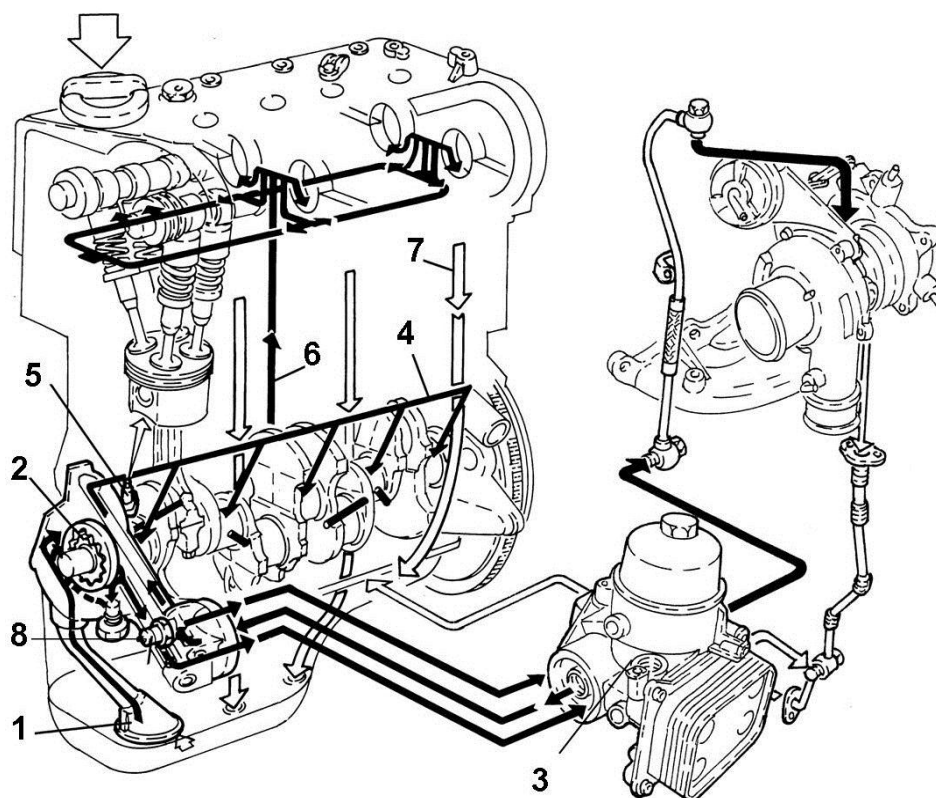


Рис. 6. Система смазки двигателя 1.4 t-jet 16V FIAT Powertrain:

- 1 – маслопровод с сетчатым фильтром; 2 – масляный насос; 3 – интегрированная система фильтрования масла двигателя; 4 – главный масляный канал; 5 – распылители (охлаждение поршня); 6 – вертикальные каналы (смазка подшипников распредвалов); 7 – возврат смазочного масла в картер; 8 – датчик контрольной лампы аварийного давления масла

Пример двигателя легкового автомобиля с организацией подачи масла в турбокомпрессор после фильтра и теплообменника показан на рис. 6. Данная схема обеспечивает стабильность подачи масла в ТКР независимо от состояния двигателя и сокращает задержку подачи масла при пуске.

Приведенная схема системы смазки с отбором масла для турбокомпрессора от модуля масляного фильтра с теплообменником используется в настоящее время на подавляющем большинстве турбированных двигателей легковых автомобилей.

Таким образом, отвод магистрали для смазки турбокомпрессора следует осуществлять после систем охлаждения и фильтрации масла, но как можно ближе к масляному насосу.

В качестве меры по минимизации недостатка масла на режимах пуска при отрицательных температурах возможно использования давно известной системы – системы прокачивания масла перед запуском ДВС. Особым преимуществом этой системы является положительное влияние не только на ТКР, но и на весь двигатель, в котором также существует проблема нарушения условий смазки в условиях холодного пуска.

Система предварительного прокачивания масла может иметь собственный насос с электрическим приводом, но может также использоваться и штатный насос, в случае, если возможна организация его электрического привода, помимо привода от коленчатого вала ДВС.

Изменение геометрической формы части ротора является эффективным способом снижения теплового потока в теле и уменьшения температур в ключевых точках. При этом необходимо контролировать важные прочностные характеристики ротора, по возможности оптимизируя их.

Меры по снижению тепловой нагрузки на турбокомпрессор также способствуют повышению срока службы масла, положительно влияют на процессы изменения технического состояния ДВС.

Библиографический список

1. **Бердников, Л.А.** Исследование возможности тепловой оптимизации ротора турбокомпрессора с проведением конечно – элементных анализов / Л.А. Бердников, И.А. Суворов // Труды НГТУ им Р.Е.Алексеева. – 2013. – № 4. С. 56–65.
2. Пат. № 159068. Россия. Конструкция для предотвращения угара масла в турбокомпрессоре / Л.А. Бердников, И.А. Суворов; заявл. 17.06.2015.
3. **Бердников, Л.А.** Улучшение температурного состояния турбокомпрессоров автомобильных двигателей / Л.А. Бердников, И.А. Суворов // Автотранспортное предприятие. – 2014. – № 4. – С. 40–42.
4. Пат. № 141164. Россия. Экран теплоизолирующий турбокомпрессора / Л.А. Бердников, И.А. Суворов, Н.А. Кузьмин; заявл. 22.04.2014.
5. **Корчажкин, М.Г.** Исследование надежности топливных систем автомобильных дизельных / М.Г. Корчажкин, Е.А Хоряев // Беспилотные транспортные средства: проблемы и перспективы: сб. мат. 94 международной научно-технической конференции Ассоциации автомобильных инженеров. – 2016. – С. 240–245.
6. **Корчажкин, М.Г.** Повышение эксплуатационной надежности двигателей городских автобусов, работающих на режимах высоких тепловых нагрузок: дисс. ... канд. техн. наук / М.Г. Корчажкин. 2005.
7. **Кустиков, А.Д.** Проблемы надежности трансмиссий городских автобусов / А.Д. Кустиков, Н.А. Кузьмин, М.Г. Корчажкин // Труды НГТУ им Р.Е. Алексеева. – 2013. – № 4 (101). – С. 18–26.
8. **Суворов, И.А.** Улучшение температурного состояния турбокомпрессоров автомобильных двигателей / И.А.Суворов, Л.А. Бердников // Автотранспортное предприятие. – 2014. – № 4. – С. 40–42.

Дата поступления
в редакцию 30.05.2018

A.A. Pikulkin¹, L.A. Berdnikov¹, M.G. Korchazhkin¹, L.A. Zakharov¹, P.P. Bazhan²

**RESEARCH OF INCREASE THERMAL RESISTANCE
OF INSULATION THE CENTRAL BODY OF AN AUTOMOBILE TURBOCHARGER
INTERNAL COMBUSTION ENGINES**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev¹,
Center for Development of Rules in the structure of the
Upper Volga branch of the Russian River Register²

Purpose: Increase of thermal resistance of insulation the central body of an automobile turbocharger internal combustion engines.

Design/methodology/approach: The use of thermal screens to reduce heat transfer to the central body of the turbocharger from exhaust gases.

Findings: A variant of the turbine part of the turbocharger housing improvement to ensure the efficiency of the heat shield.

Research limitations/implications: The list of the main parameters of the turbocharger is presented and their permissible limits for trouble-free operation.

Originality/value: Ways of improving the thermal resistance of the heat shields. The most unfavorable operating conditions of the engine and turbocharger leading to failures.

Key words: turbocharger, heat shield, thermal resistance, critical mode, oil temperature, bearing assembly, reliability, cold start.