

УДК 621.43.052

DOI: 10.20998/0419-8719.2016.1.09

А.В. Тринёв, Д.Г. Сивых, В.А. Несвитайло

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ЛОКАЛЬНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ПОДШИПНИКОВОГО УЗЛА ТУРБОКОМПРЕССОРА АВТОТРАКТОРНОГО ДИЗЕЛЯ

Приведены результаты безмоторных экспериментов, в которых воспроизведена физическая модель системы автоматического регулирования теплового состояния подшипника турбокомпрессора ТКР-11Н, проведено численное моделирование работы системы для идентификации результатов физического моделирования. Отмечается эффективность системы локального воздушного охлаждения при работе турбокомпрессора на форсированных режимах, а также при резких сбросах нагрузки и аварийных остановках двигателя. Проведенный безмоторный эксперимент подтверждает возможность регулирования теплового состояния подшипника на критических эксплуатационных режимах.

Введение

Важнейшей проблемой при разработке и совершенствовании конструкций современных авто-

тракторных дизелей остается дальнейшее улучшение их топливной экономичности, экологических показателей при высокой надежности основных

механизмов и систем. Одним из путей решения поставленной проблемы, является использование наддува, в частности для быстроходных дизелей, работающих при частых и резких изменениях нагрузки. В значительной степени повышению общего КПД агрегата наддува способствует снижение механических потерь в подшипниковом узле, что достигается за счет стабильной смазки узла, создания условий для эффективного теплоотвода от подшипника к турбокомпрессору (ТК), и от наиболее нагретой части ротора со стороны турбинного колеса. При этом, как показывают результаты проведенных испытаний, а также опыт эксплуатации ТК на быстроходных дизелях автотракторного типа, условия смазки могут ухудшиться при резких сбросах нагрузки, аварийных остановках дизеля, а также при работе на режимах с высоким уровнем форсирования по температуре цикла. Указанные режимы сопровождаются забросом температуры подшипника, перегревом ротора, его деформацией, что может привести к выходу ТК из строя. Решением отмеченной проблемы могло бы служить локальное, управляемое в автоматическом режиме охлаждение подшипникового узла.

В работе на основе проведенных экспериментальных и расчетных исследований теплового состояния подшипниковых узлов турбокомпрессоров ТКР-8,5, ТКР-11, которые используются для наддува автотракторных дизелей, подтверждена эффективность локального воздушного охлаждения (ЛВО) узла на отдельных, критических режимах, а также показана возможность выборочного автоматического управления на таких режимах.

Анализ публикаций

Результаты экспериментальных исследований теплового состояния подшипникового узла турбокомпрессора ТКР-11Н приведены в работе [1]. Как отмечалось в публикации, подшипниковый узел этого ТК выполнен в виде бронзовой невращающейся моноштулки и имеет две радиальные опорные и две торцевые трущиеся поверхности. Подшипник установлен в центральной бобышке среднего корпуса, при работе двигателя смазывается моторным маслом.

Испытание ТК проводилось на дизеле 4ЧН12/14 по нагрузочной характеристике при частоте вращения коленчатого вала $n_{кв}=1900$ мин⁻¹ на режиме номинальной мощности. Исследовалось тепловое состояние подшипника с помощью двух термопар, установленных на упорных торцевых поверхностях. Кроме установившихся режимов, в эксперименте моделировались медленная и критическая для ТК резкая остановки ДВС.

На установившихся режимах температуры подшипника со стороны компрессора и турбины практически одинаковые, что объясняется высокой теплопроводностью материала подшипника-бронзы. В зависимости от режима нагружения температура подшипника также изменяется незначительно (103°С на режиме с $p_e=0,6$ МПа и 112°С на режиме с $p_e=0,94$ МПа). Резкая остановка дизеля (отключение топливоподачи), работавшего на режиме номинальной мощности, приводит к забросу температуры подшипника на $\Delta t=80-90$ °С [1]. Указанный эффект вызван прекращением подачи масла к подшипнику и, соответственно, резким снижением теплоотвода от подшипника. Результаты экспериментального исследования [1] были в последующем использованы для восстановления исходного температурного поля подшипника на номинальном режиме в безмоторном эксперименте с моделированием ЛВО подшипника, а также для разработки математической модели (ММ) теплонапряженного состояния подшипникового узла ТК и в дальнейшем разработки ММ агрегата в целом.

Результаты комплексных экспериментальных исследований теплового состояния турбокомпрессора ТКР-11Н анализируются в работе [2]. Испытания проводились на безмоторной установке и на двигателе 4ЧН12/14. В ходе безмоторных испытаний в качестве рабочего тела для турбины использовался газ с температурой 910-930К, получаемый сжиганием дизельного топлива в камере сгорания. Смазка подшипникового узла и его охлаждение производились за счет подачи моторного масла под давлением 0,3-0,35 МПа и температуры 350-360К. Закон изменения давления на выходе из компрессора при испытаниях на безмоторной установке соответствовал расходной характеристике двигателя, работающего по нагрузочной характеристике при номинальной частоте вращения коленчатого вала $n_{кв}=1900$ мин⁻¹. Как в безмоторном, так и в моторном экспериментах определялись температуры среднего корпуса со стороны компрессора Т1, температура диска уплотнения компрессора в зоне контакта уплотнительного кольца с внутренней поверхностью диска Т2, температура среднего корпуса со стороны турбины за диском рабочего колеса Т3, температура диска уплотнения турбины в зоне контакта уплотнительного кольца с внутренней поверхностью диска Т4 [2]. Отмечается хорошее согласование результатов моторных и безмоторных испытаний, детально проанализированы температурные характеристики по отдельным контрольным участкам ТК в зависимости от температуры отработавших газов на входе в турбину. Полученные экспериментальные результаты [2] были

использованы в ходе расчетных исследований температурного состояния подшипникового узла.

Расчетные экспериментальные исследования влияния конструкции подшипникового узла мало-размерного ТК на процессы смазки и теплоотвода рассматриваются в работе [3]. На расчетном этапе исследования разработана конечноэлементная узловая математическая модель теплового состояния турбокомпрессора ТКР-8.5, позволяющая оценить влияние отдельных конструктивных факторов на тепловое состояние подшипника. Предложенный вариант решения позволяет снизить температуру подшипника на 25-30°C [3]. Таким образом, как показал проведенный анализ литературных источников, исследование теплового состояния малоразмерных ТК для автотракторных дизелей с учетом роста уровня их форсирования и разработка мероприятий, снижающих теплонапряженность деталей ТК, были и являются актуальными.

Цели и задачи исследования

Цель работы – повышение надежности мало-размерных ТК, которые устанавливаются на форсированных дизелях автотракторного типа. В работе ставились и были решены следующие задачи:

- оценить эффективность ЛВО подшипникового узла ТК в ходе безмоторного эксперимента;
- разработка ММ теплового состояния подшипника ТК с локальным охлаждением, уточнение по результатам безмоторного эксперимента граничных условий задачи теплопроводности;
- разработка системы автоматического регулирования теплового состояния (САРТС) подшипника ТК, проверка работоспособности САРТС в ходе безмоторного эксперимента.

Основные результаты исследования

В качестве объекта исследования был выбран подшипник скольжения (бронзовая втулка турбокомпрессора ТКР-11Н). В серийном варианте ТК подшипник установлен в центральной бобышке среднего корпуса с зазором 60-107 мкм, зазор между шейками вала ротора и опорными поверхностями подшипника составляет 20-99 мкм. От вращения и осевого перемещения он удерживается осевым фиксатором, через который организован торцевой подвод масла к трущимся поверхностям [1]. В отдельных конструктивных вариантах ТК этой и близких размерностей применялось жидкостное охлаждение среднего корпуса с образованием дополнительных проточных полостей в корпусе, соединенных с рубашкой охлаждения двигателя. При этом увеличивались габариты и масса ТК, возникали проблемы с уплотнением полостей охлаждения. Недостатком такого конструктивного варианта также является то, что при внезапной остановке

двигателя и прекращении циркуляции жидкостного охладителя-смазочного масла через ТК неизбежны забросы температуры подшипника, температурные деформации ротора, о которых ранее говорилось. Управляемое воздушное охлаждения подшипника позволяет устранить эти недостатки.

Оценка эффективности ЛВО подшипника была проведена на стенде, детальное описание которого можно найти в работе [4]. Для проведения эксперимента был изготовлен узел подшипника, содержащий стальной корпус и крышку, а также размещенный в образованной полости подшипник-бронзовую втулку турбокомпрессора ТКР-11Н. Посредством штуцера к проточной полости в корпусе подводился сжатый воздух. Подшипник был оснащён тремя термодарами хромель-алюмель, установленными вблизи краев и посередине подшипника. На рис.1 показан общий вид узла.



Рис.1. Общий вид экспериментального подшипникового узла

Стенд также снабжён ресивером поршневого компрессора (источник сжатого воздуха в системе ЛВО), промежуточным ресивером для стабилизации давления воздуха непосредственно на входе в узел подшипника, расходомером воздуха РГ-40. Контролируются также температура и давление охлаждающего воздуха в промежуточном ресивере. Значение температуры в контрольных точках подшипника фиксировались в цифровой форме с помощью разработанного специально для этого эксперимента АЦП, а также параллельно контролировались по цифровому вольтметру А 565.

Безмоторный эксперимент проводился в два этапа. На первом этапе ставилась задача оценить эффективность воздушного охлаждения подшипника при резкой остановке двигателя и забросе температур до 170-190°C [1]. При этом оценить скорость снижения температуры подшипника в зависимости от избыточного давления сжатого воздуха, его температуры на входе в узел. На всех режимах определялся расход охладителя, что позволяет определить уровень энергетических затрат,

необходимых для такого локального охлаждения. На этом этапе включение и отключение подачи воздуха производилось в ручном режиме без элемента автоматизации. Подшипник нагревался до критических температур электронагревателем и по достижению этих значений включалась подача охладителя.

На рис.2 представлен график изменения температуры подшипника в контрольной точке 1 на одном из режимов с указанными параметрами охладителя. Подшипник установлен вертикально, подогрев производится со стороны его нижнего торца. Расход охладителя на представленном режиме составил $G_6=5,1 \text{ м}^3/\text{ч}$ при избыточном давлении $p_6=0,3 \text{ МПа}$.

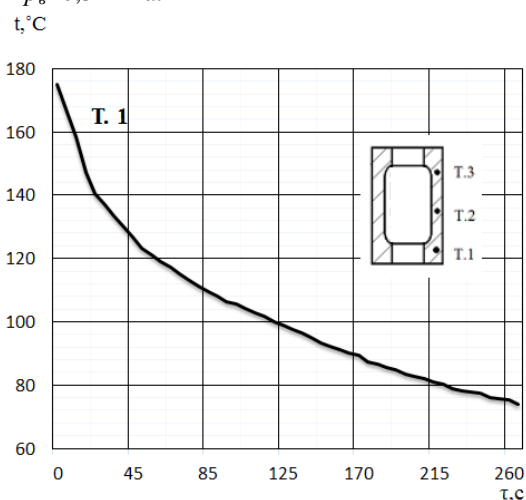


Рис. 2. Изменение температуры подшипника в контрольной точке 1 от момента подачи охлаждающего воздуха ($G_6=5,1 \text{ м}^3/\text{ч}$ $p_6=0,3 \text{ МПа}$)

На втором этапе исследования решалась задача автоматизации процесса охлаждения. Поставленная задача является не менее важной, т.к. постоянная подача охладителя на всех режимах нерациональна, связана с дополнительными затратами мощности двигателя на привод воздушного компрессора, например, тормозного, который предполагается использовать в качестве источника сжатого воздуха в системе ЛВО подшипникового узла.

В качестве задающего параметра в САРТС может быть назначена температура отработавших газов на выходе из турбины ТК, ее максимальные, критические значения, при заданном уровне форсирования двигателя. При этом в случае резкого сброса нагрузки, аварийной остановки двигателя включение подачи охладителя может производиться для предотвращения поломки подшипника в ручном, аварийном режиме.

Разработанная САРТС подшипника ТК представляет собой терморегулятор с гистерезисом по

температуре включения-выключения. Основой системы служит микроконтроллер ATmega328, характеристики которого по данным [5] приведены в табл.1.

Таблица 1. Характеристики микроконтроллера ATmega328

Рабочее напряжение	5В
Цифровые входы/выходы	14 (в т.ч. 6 ШИМ-выходы)
Аналоговые входы	6
Максимальный ток одного вывода	40 мА
Максимальный выходной ток вывода 3.3V	50 мА
Flash-память	32 КБ
SRAM	2 КБ
EEPROM	1 КБ
Тактовая частота	16 МГц

Функциональная схема контроллера теплового состояния показана на рис.3. Плата системы управления имеет преобразователь интерфейсов USB-UART на микроконтроллере ATmega16U2.

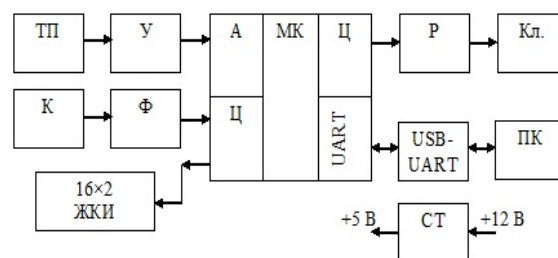


Рис. 3. Функциональная схема контроллера теплового состояния:

ТП – термопара; У – усилитель; К – кнопка; Ф – фильтр; ЖКИ – жидкокристаллический индикатор; МК – микроконтроллер; А – аналоговый вход; Ц – цифровые входы/выходы; Р – реле; Кл. – клапан электромагнитный; СТ – стабилизатор вторичного электропитания; ПК – персональный компьютер; UART – интерфейс последовательного обмена; USB-UART – преобразователь интерфейсов

С помощью преобразователя осуществляется USB подключение с персональным компьютером для перепрограммирования, а также для визуализации контролируемых параметров температуры с исследовательской целью. Благодаря соответствующему программному обеспечению возможно управление с ПК и запись данных на диск.

Напряжение питания +12 В от аккумуляторной батареи преобразуется стабилизатором напряжения в +5 В для питания узлов схемы. Для контроля температуры используется термопара хромель-алюмель с нормирующим усилителем на основе операционного усилителя LM358. Диапазон

измеряемых температур ограничен верхним пределом 700 °С.

При необходимости подачи воздуха для охлаждения, через управляемое от микроконтроллера реле коммутируется на землю цепь питания электромагнитного клапана. В качестве такого исполнительного устройства в разработанной САПС нами был использован промышленно изготавливаемый фирмой Lovato клапан, применяемый в газобаллонном оборудовании для перекрытия газовой магистрали при стоянке или работе двигателя на бензине. Общий вид клапана представлен на рис.4.



Рис. 4. Электромагнитный клапан

Клапан имеет следующие основные характеристики [6]: диаметр входной магистрали 6мм; мощность катушки электромагнитного клапана 8Вт, напряжение питания 12В. Взаимодействие оператора с системой управления осуществляется посредством двухстрочного 16-ти символьного жидкокристаллического индикатора с регулируемой подсветкой (рис.5). На индикатор выводится информация о текущем состоянии клапана (включён - выключен), регистрируемая температура и время в секундах до выключения клапана подачи охлаждающего воздуха.

При необходимости ручного управления открытием клапана дополнительно предусмотрена кнопка, изменяющая состояние клапана (открыт – закрыт). Как отмечалось, в этом режиме система работает при аварийных остановках двигателя, резком сбросе нагрузки. Переключение клапана в ручном режиме будет выполняться только в интервале контролируемой температуры между минимальной температурой выключения и максимальной температурой включения.

Логика работы системы заключается в непрерывном контроле температуры, которая регистрируется термопарой. Как только температура превысит максимально допустимую температуру, включится реле питания клапана. При этом клапан откроется, проходящий через него воздух попадет в турбокомпрессор, и температура начнет снижаться. Как только температура понизится до установленной температуры выключения, клапан закроется.

При открытом положении клапана производится обратный отсчет времени, определенный на работу по охлаждению. Если этого времени будет недостаточно для достижения нижнего предела регулирования, система отключит подачу воздуха по истечению времени.



Рис.5. Жидкокристаллический индикатор

Таким образом, при доводке САПС подлежат настройке три параметра управления: максимальная температура включения клапана; минимальная температура выключения клапана; время подачи воздуха для охлаждения.

При проведении безмоторного эксперимента для проверки работоспособности САПС в реальном времени визуализировались данные по изменению температуры на виртуальном приборе, составленном в программе LabView. Внешний вид прибора представлен на рис.6.

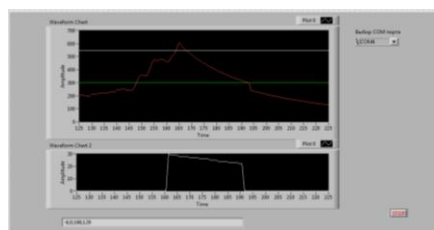


Рис.6. Внешний вид виртуального прибора

Следующим этапом исследования может стать моторный эксперимент с установкой на двигателе модернизированного варианта турбокомпрессора с локальным воздушным охлаждением подшипникового узла.

При работе двигателя на режимах с предельно высокой температурой отработавших газов, а также при резкой остановке двигателя предполагается для охлаждения подшипника использовать запас сжатого воздуха, хранящийся в баллонах тормозной системы автомобиля или в автономной системе локального воздушного охлаждения. Такие автономные системы могут найти практическое применение на большегрузных автомобилях, для которых

дополнительное увеличение массы, связанное с размещением элементов системы локального охлаждения, является несущественным, но повышает показатели надежности форсированного ДВС и турбокомпрессора.

Заключение

Проведенные безмоторные эксперименты с моделированием управляемого в автоматическом режиме ЛВО подшипникового узла подтвердили эффективность такого охлаждения для режимов с высоким уровнем форсирования автотракторных дизелей, а также на режимах с резким сбросом нагрузки при аварийных остановках двигателя. Планируется для подтверждения работоспособности и надежности системы проведение моторных испытаний.

Список литературы:

1. Анализ работы подшипника турбокомпрессора при изменении нагрузки двигателя [Текст] / Д.М. Кельштейн, Ю.А. Красницкий, О.А. Позняков // Двигатели внутреннего сгорания. – 1989. – №48/89. – С. 112 – 117. 2. Определение температуры деталей турбокомпрессора ТКР – 7Н [Текст] / Н.И. Верба, Ю.А. Красницкий, М.Я. Рабинович и др. // Двигатели внутреннего сгорания. – 1982. – №35. – С.104 – 105. 3. Луцкеко В.А. Формирование и обеспечение качества подшипникового узла турбокомпрессора высокофорсированного автомобильного дизеля на этапе проектирования и доводки: автореф, дис. канд.

тех. наук Луцкеко Василий Александрович. - Набережные Челны, 2014 – 19с. 4.Триньов О.В. Наукові основи локального охолодження теплонапружених деталей ДВЗ: монографія / О.В. Триньов. – Харків: “Підручник НТУ “ХПІ”. 2014 – 240с. 5. ATmega48/PA/168A/PA/328/P Datasheet, - 2015 Atmel Corporation. / Rev.: Atmel-8271JS-AVR- ATmega-Datasheet_11/2015. 6. Lovato. Let the blue drive you, - General catalogue, - Режим docmyna: http://www.lovatogas.com/general_catalogue/#1.

Bibliography (transliterated):

1. Kelshteyn, D.M., Krasnitskiy, Y.A., Poznyakov, O.A. (1989), "Analysis of the work of the turbocharger bearing when changing engine load", Internal combustion engines ["Analiz roboty podshpivnika turbokompresora pri izmenenii nagruzki dvigatelya", Dvigateli vnutrennego sgoraniya], No 48, pp. 112 - 117. 2. Verba, N.I., Krasnitskiy, Y. A., Rabinowitz, M.J. (1982), "Determination of the temperature of the turbocharger TCR -8H", Internal combustion engines ["Opredelenie temperatury detaley turbokompresora TKR – 7N", Dvigateli vnutrennego sgoraniya], No 35, pp.104-105. 3. Luscheko, V.A. (2014), The formation and maintenance of quality turbocharger bearing assembly of high performance automotive diesel engine at the design stage and finishing: Author's thesis [Formirovanie i obespechenie kachestva podshpivnikovogo uzla turbokompresora vysokoforsirovannogo avtomobilnogo dizelya na etape proektirovaniya i dovodki: avtoref, dis. kand. teh. nauk Luscheko Vasiliy Aleksandrovich], Naberezhnye Chelny, 19p. 4. Trynov, A.V. (2014), Scientific basis of local cooling teplonapruzhenykh details ICE: Monograph [Naukovi osnovy lokalnoho okholodzhennya teplonapruzhenykh detaley DVZ: monohrafiya], Kharkiv, NTU"KPI", 240 p. 5. ATmega48/PA/168A/PA/328/P Datasheet, - 2015 Atmel Corporation. / Rev.: Atmel-8271JS-AVR- ATmega-Datasheet_11/2015. 6. Lovato. Let the blue drive you, - General catalogue, - Access mode: http://www.lovatogas.com/general_catalogue/#1.

Поступила в редакцию 01.01.2016 г.

Тринёв Александр Владимирович – канд. техн. наук, доцент, кафедры двигателей внутреннего сгорания Национального технического университета «ХПИ», Харьков, Украина, e-mail: atrinev@gmail.com

Сивых Дмитрий Георгиевич – канд. техн. наук, доцент, кафедры информационных технологий и систем колёсных и гусеничных машин им. А.А. Морозова Национального технического университета «ХПИ», Харьков, Украина, e-mail: sivikh1979@gmail.com

Несвитайло Владимир Анатольевич – студент 6 курса факультета транспортного машиностроения Национального технического университета «ХПИ», Харьков, Украина. e-mail: nesvitaylo.v@mail.ru

РОЗРОБКА СИСТЕМИ ЛОКАЛЬНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ ПІДШИПНИКОВОГО ВУЗЛА ТУРБОКОМПРЕСОРА АВТОТРАКТОРНОГО ДИЗЕЛЯ

О.В. Триньов, Д.Г. Сивых, В.А. Несвітайло

Наведено результати безмоторних експериментів, в яких відтворено фізичну модель системи автоматичного регулювання теплового стану підшипника турбокомпресора ТКР-11Н, проведено числове моделювання роботи системи для ідентифікації результатів фізичного моделювання. Відзначається ефективність системи локального повітряного охолодження при роботі турбокомпресора на форсованих режимах, а також при різких скиданнях навантаження та аварійних зупинках двигуна. Проведений безмоторний експеримент підтверджує можливість регулювання теплового стану підшипника на критичних експлуатаційних режимах.

DEVELOPMENT OF LOCAL COOLING BEARING UNITS AVTOMOTIVE DIESEL TURBOCHARGER

A. Trynov, D. Sivyh, V. Nesvitaylo

Results of motorless experiments are given. In this are reproduced the physical model of the turbocharger bearing TKR-11N thermal state automatic regulation system, a numerical system operation simulation to identify the results of physical modeling. There efficiency of local air cooling while working on turbocharger forced modes, as well as sudden dumping of load and emergency stops the engine. Held without motorized experiment confirms the ability to heat a bearing on the state of regulation of critical operating conditions.