

УДК 621.432

ВОПРОСЫ СИСТЕМНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ТУРБОКОМПРЕССОРОВ

Бурцев А.Ю.¹, Гриценко А.В.²

¹к.т.н., доцент кафедры «Горного дела и техносферной безопасности» филиала Кузбасского государственного технического университета им. Т.Ф. Горбачева, г. Белово.

²д.т.н., профессор кафедры «Автомобильный транспорт», ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет» (ЮУрГУ НИУ); профессор кафедры «Технический сервис машин, оборудования и безопасности жизнедеятельности», ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный аграрный университет» (ЮУрГАУ), г. Челябинск.

Аннотация. В данной статье представлен системный подход к качественному обеспечению эксплуатационной надежности турбокомпрессоров сельскохозяйственных машин. Разработана концепция обеспечения надежности турбокомпрессоров двигателей внутреннего сгорания. Предложен комплекс эффективных методов и средств снижения тепловой нагруженности элементов турбокомпрессоров. Эффективность разработанных мероприятий обеспечивается гарантированным увеличением надежности турбокомпрессора и двигателя внутреннего сгорания.

Ключевые слова: системный подход, эксплуатационная надежность, сельскохозяйственная машина, двигатель, турбокомпрессор, контроль.

Актуальность исследования. В современных условиях быстрыми темпами развивается отрасль машиностроение [1, 2, 3]. На смену атмосферным двигателям приходят высокофорсированные газотурбинные двигатели [4, 5, 6]. Для них характерны высокая степень сжатия и большая работа, выполняемая за один рабочий цикл двигателя [7, 8]. Эффективность работы таких двигателей гораздо выше [9, 10, 11]. Однако, наряду с высокой эффективностью такие двигатели имеют ряд существенных недостатков: чувствительность к качеству горюче-смазочных и расходных материалов, зависимость от периодичности и качества проведения технического обслуживания, высокие удельные силовые и температурные нагрузки на ответственные узлы [12, 13, 14]. Первый и второй недостатки можно компенсировать только качественными действиями, направленными на усовершенствование материалов и методов [15, 16, 17]. Третий недостаток предлагается устранить путем разработки комплексных мер на основе использования системного подхода [18, 19, 20]. Суть подхода заключается в совершенствовании средств контроля и управления процессами смазки, воздухоподачи и охлаждения турбокомпрессоров современных сельскохозяйственных машин [21, 22]. С учетом сказанного, **целью исследования** является обоснование и разработка системного подхода к вопросам обеспечения надежности турбокомпрессоров современных машин.

Материалы и методы. Для дальнейшей успешной работы важно разработать концепцию обеспечения надежности ТКР двигателей внутреннего сгорания рисунок 1.

Представленная на рисунке 1 концепция обеспечения надежности ТКР ДВС включает в себя комплекс мероприятий по обеспечению эффективности, технологичности, безопасности, экологичности, экономичности и надежности [23, 24]. Каждый из этих показателей реализуется комплексом различных конструктивных мероприятий и поддерживается при эксплуатации в заданных пределах [25]. Так, например, показатель эффективности чаще всего содержит безразмерные показатели, косвенно характеризующие затраты денежных средств.

Вторым важным показателем выступает технологичность. Этот показатель определяет комплекс свойств турбокомпрессора, характеризующих его способность к обеспечению минимального уровня трудовых и денежных затрат ресурсов при использовании системы турбонаддува по назначению. Технологичность изготовления многих составных элементов турбокомпрессора в современных условиях автоматизированного производства может значительно сократиться. Поэтому важно сопоставлять данный показатель с применяемой технологией для адекватной оценки технологического уровня производства и использовании каждого отдельного составного элемента системы турбонаддува.

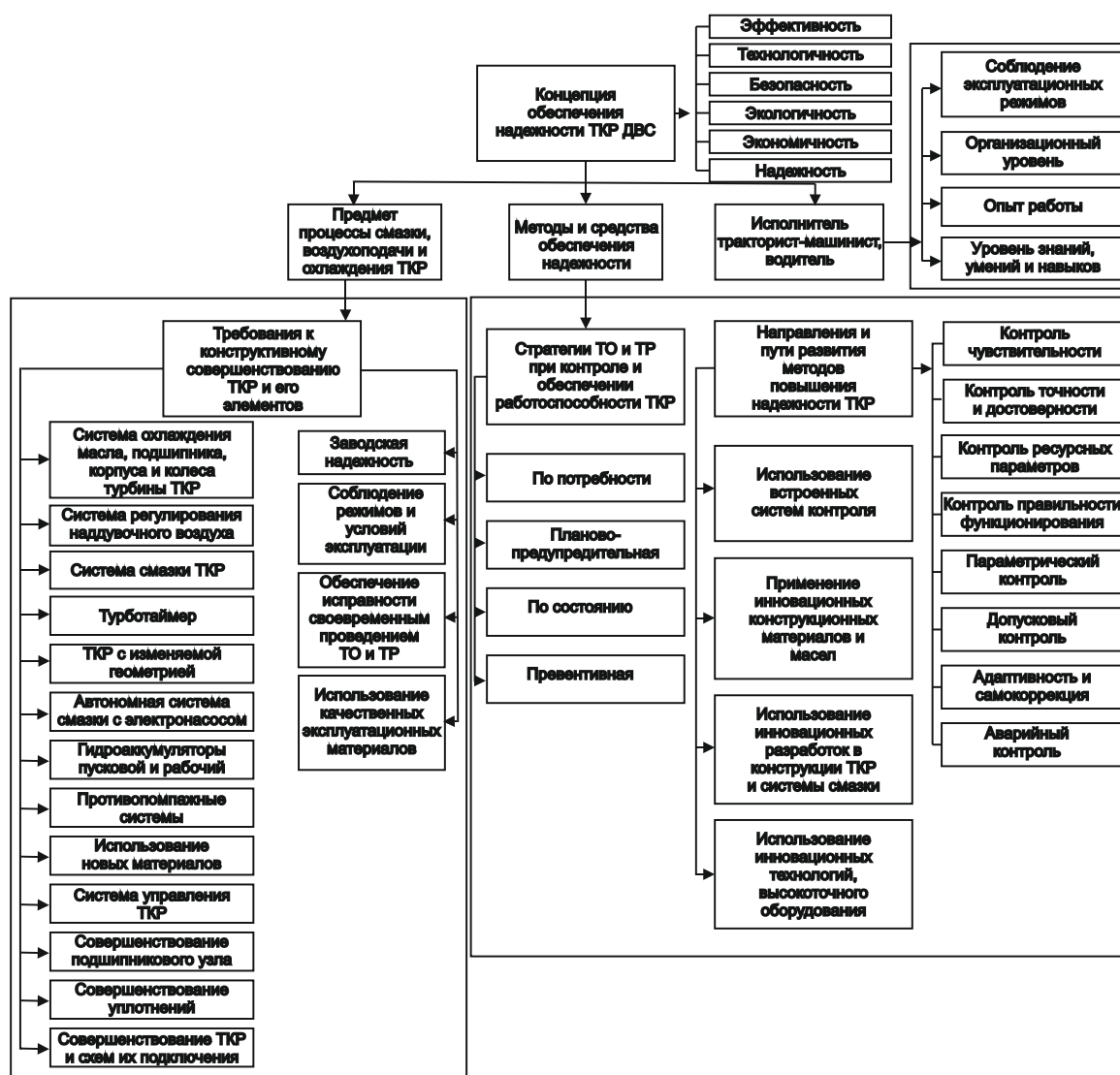


Рисунок 1 – Концепция обеспечения надежности ТКР двигателей внутреннего сгорания

В практике использования современных систем турбонаддува выделяется несколько видов технологичности: эксплуатационная (в нашей работе данный тип технологичности превалирует над остальными); производственная (в частности, можно использовать данный тип при установке разработанных инноваций в штатную систему); ремонтная (характеризующая приспособленность к проведению ремонтных воздействий).

В реальном производстве элементов и систем турбонаддува важна количественная и качественная оценка уровня технологичности. Количественный показатель технологичности может быть определен из уравнения:

$$K_i = \frac{Q_T}{Q_\Sigma}, \quad (1)$$

где K_i – количественный показатель технологичности, %; Q_T – количество единичных деталей в системе турбонаддува, подходящих сформированным условиям технологичности, шт; Q_Σ – суммарное количество деталей в системе турбонаддува, шт.

Качественный показатель технологичности находится на основании субъективных методов контроля. Данная оценка дается в начале реализации инновационной технологии и отвечает на возможность дальнейшей применимости по двум критериям: «соответствует» или «не соответствует», «да» или «нет».

Следующим критерием, очень важным для оценки автотракторных систем турбонаддува является – безопасность. Критерий безопасности может касаться вопросов проектирования и разработки новых ТКР, их сборки и доводки, эксплуатации в различных условиях при значительном варьировании режимов, а также при возможных проявлениях экстремальных условий смазки подшипников ТКР при оценке риска формирования отказного состояния.

Отдельным направлением выделяют экологическую безопасность. Система турбонаддува обеспечивает цилиндры ДВС свежим воздухом, сжатым до рабочей величины давления. За счет чего существенно улучшается наполняемость цилиндра и обеспечивается работа на сверхбедных топливно-воздушных смесях. Любые нарушения качественного наполнения приводят к существенному ухудшению процесса сгорания и как следствие, ухудшению экологической безопасности. Контроль экологической безопасности на сегодня является основой эксплуатации автотракторных средств.

Основным предметом исследования как видно из рисунка 1 являются процессы смазки, воздухоподачи и охлаждения ТКР. Только обеспечивая комплексную работу можно добиться серьезных изменений уровня надежности основного узла газотурбинного наддува – турбокомпрессора. Эта комплексная работа будет видна из обеспечения требований к конструктивному совершенствованию ТКР и его элементов. Сформируем основные требования и проведем анализ каждого из них: 1. Система охлаждения масла, подшипника, корпуса и колеса турбины ТКР; 2. Система регулирования наддувочного воздуха; 3. Система смазки ТКР; 4. Турботаймер; 5. ТКР с изменяемой геометрией; 6. Автономная система смазки с электронасосом; 7. Гидроаккумуляторы пусковой и рабочий; 8. Противопомпажные системы; 9. Использование новых материалов; 10. Система управления ТКР; 11. Совершенствование подшипникового узла; 12. Совершенствование уплотнений; 13. Совершенствование ТКР и схем их подключения.

Для обеспечения требований первого пункта необходима разработка комплекса мероприятий. Так, например, для обеспечения охлаждения масла используется масляный радиатор с электровентилятором и термостатом. Их работа может быть синхронизирована с помощью электронного блока управления для обеспечения максимальной эффективности охлаждения масла. Подшипник в основном охлаждается маслом, поэтому мероприятия проводимые для регулирования температуры масла существенно влияют на охлаждение подшипника. Однако, в последних версиях конструктивного исполнения турбокомпрессора, нашел применение способ принудительного охлаждения корпуса подшипника ТКР с помощью жидкостной системы охлаждения ДВС (в корпусе подшипника выполнена рубашка охлаждения).

Для охлаждения корпуса ТКР на него устанавливается кожух, образуя полость, в которую подается наддувочный воздух и охлаждает его снаружи. Тот же наддувочный воздух направляется внутрь корпуса турбины, охлаждая корпус изнутри и колесо турбины ТКР. Тем самым исключается теплопередача от корпуса турбины, колеса турбины и вала ротора к корпусу подшипников, что исключает явление перегрева и преждевременного старения масла, а также его закоксовывание в маслянных каналах.

В современных турбокомпрессорах применяется система регулирования наддувочного воздуха, которая имеет в своей конструкции управляющий клапан сброса избыточного давления наддувочного воздуха. Конструкция клапана сброса связана с быстродействием системы и разрядностью применяемого ЭБУ. Совершенствование данной системы направлено на обеспечение скорости и качества процесса регулирования. Скорость процесса регулирования определяется быстродействием системы. Быстродействие системы можно обеспечить за счет применения малоинерционных элементов (например, облегченных клапанов сброса давления). Однако, скорость их срабатывания может быть несопоставима с чувствительностью датчика измерителя мгновенного давления. Поэтому на сегодняшний день разрабатываются эффективные, высоконадежные датчики давления с чувствительной мембраной, воспринимающей малейшие изменения давления. Однако, избыточная чувствительность датчика давления будет вызывать высокочастотные колебания при его срабатывании (в том числе резонансные процессы). В тот же момент, разрядность применяемого ЭБУ должна обеспечивать заданную скорость обработки данных, поступающих с чувствительного элемента датчика давления и обеспечение адекватной скорости срабатывания клапана сброса. Таким образом, очень важно обеспечить согласование устройств регулирования наддувочного воздуха, измерительных процессов, функционирования обратной связи.

В современных турбокомпрессорах активно совершенствуется конструкция системы смазки ТКР. Разрабатываются различные вариации систем для качественного процесса смазки и обеспечения жидкостного трения в подшипнике ТКР. Для чего значительно варьируются величины давления, подачи (расхода) и температуры масла на входе и выходе подшипников ТКР. Конструктивные мероприятия касаются и корпусных элементов ТКР, а также внутренних полостей, каналов, канавок, маслопроводов и др.

Выводы. В материалах статьи рассмотрена системная проблема обеспечения надежности современных турбокомпрессоров. Намечены пути увеличения надежности двигателей с газотурбинным наддувом. Проведен анализ конкретных мероприятий, направленных на совершенствование систем смазки, охлаждения и воздухоподдачи турбокомпрессоров. Комплексное применение всех рассмотренных в материалах статьи вопросов позволяет управлять техническим состоянием двигателей с турбонаддувом.

Список литературы:

1. Обоснование возможности диагностирования подшипникового узла турбокомпрессора по расходным характеристикам в среде MATLAB / И. И. Курбаков, А. П. Иншаков, М. С. Курбакова, Г. С. Гребенцов // Техника и оборудование для села. 2023. № 9(315). С. 31-35. DOI 10.33267/2072-9642-2023-9-31-35. EDN ZORSRC.
2. Шакаматов, Р. Р. Анализ системы технического сервиса сельскохозяйственной техники в Германии / Р. Р. Шакаматов, А. В. Старунов // Наука: научно-производственный журнал. 2020. № 4. С. 104-108.
3. Старунов, А. В. Современное состояние организации технического сервиса в АПК на примере Челябинской области / А. В. Старунов, И. Н. Старунова // Наука: научно-производственный журнал. 2021. № 1. С. 102-106.
4. Скрыбин, В. А. Технология ремонта турбокомпрессоров / В. А. Скрыбин // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2022. № 8. С. 9-19. DOI 10.31044/1684-2561-2022-0-8-9-19.
5. Ипатов, А. Г. Повышение эффективности работы турбокомпрессора модификацией подшипниковых сопряжений / А. Г. Ипатов, А. Г. Иванов, А. В. Малинин // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. 2022. № 3(71). С. 59-63.
6. Галиев, И. Г. Усовершенствование системы смазки турбокомпрессора дизельного двигателя / И. Г. Галиев, А. Т. Кулаков, А. Р. Галимов // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. 2021. № 4(74). С. 256-261. DOI 10.34771/UZCEPU.2021.4.74.053.
7. Галиев, И. Г. Обоснование параметра работоспособности турбокомпрессора / И. Г. Галиев, А. Т. Кулаков, А. Р. Галимов // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. 2021. № 2(72). С. 251-256. DOI 10.34771/UZCEPU.2021.72.2.048.
8. Ipatov, A. G. Modification of the Bearing Interfaces of a TKR7C-6 Turbocharger / A. G. Ipatov, A. G. Ivanov, E. V. Kharanzhevskii // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2020. Vol. 49. No. 6. P. 545-549. DOI 10.3103/S1052618820060047.
9. Определение вероятности отказов агрегатов наддува двигателя КАМАЗ - 740.63.400 / Н. И. Мошкин, П. А. Болоев, Д. Ж. Самбилов, С. С. Бадмаев // Вестник ВСГУТУ. 2018. № 3(70). С. 37-42.
10. Гриценко, А. В. Исследования выбега ротора турбокомпрессора ТКР-11 / А. В. Гриценко, А. М. Плаксин, А. Ю. Бурцев // Агропродовольственная политика России. – 2015. – № 1(37). – С. 52-55.
11. Test diagnostics of engine systems in passenger cars / A. Gritsenko, V. Shepelev, E. Zadorozhnaya, K. Shubenkova // FME Transactions. – 2020. – Vol. 48, No. 1. – P. 46-52. – DOI 10.5937/fmet2001046G. – EDN SGRUWJ.
12. Parameters of internal combustion engine efficiency while introducing additives in the oil / A. Gritsenko, E. Zadorozhnaya, V. Shepelev, I. Gimaltdinov // Tribology in Industry. – 2019. – Vol. 41, No. 4. – P. 592-603. – DOI 10.24874/ti.2019.41.04.11. – EDN VBRZHC.

13. Бурцев, А. Ю. Повышение эксплуатационной надежности турбокомпрессоров дизелей тракторов / А. Ю. Бурцев, А. М. Плаксин, А. В. Гриценко // АПК России. – 2015. – Т. 72, № 1. – С. 23-25. – EDN TTUAVF.

14. Плаксин, А. М. Система смазки турбокомпрессора с электронным управлением / А. М. Плаксин, А. Ю. Бурцев, А. В. Гриценко // АПК России. – 2015. – Т. 73. – С. 90-98. – EDN SKCKED.

15. Производственный потенциал сельского хозяйства: этапы развития, состояние, проблемы модернизации / А. М. Плаксин, А. В. Гриценко, М. В. Запевалов, Н. В. Костюченков. – Челябинск: ЮУрГАУ, 2018. – 292 с. – ISBN 978-5-88156-798-9. – EDN XWKBRJ.

16. Gritsenko, A. V. A study of the environmental qualities of diesel engines and their efficiency when a portion of their cylinders are deactivated in small-load modes / A. V. Gritsenko, K. V. Glemba, A. A. Petelin // Journal of King Saud University. Engineering Sciences. – 2021. – Vol. 33, No. 1. – P. 70-79. – DOI 10.1016/j.jksues.2019.12.001. – EDN FICNSG.

17. Технология и методы диагностирования топливных насосов: учебное пособие / А. М. Плаксин, А. В. Гриценко, А. В. Старунов [и др.]. – Челябинск: ЮУрГАУ, 2022. – 100 с. – ISBN 978-5-88156-898-6.

18. Куков, С. С. Диагностирование коренных подшипников кривошипно-шатунного механизма по параметрам давления в центральной масляной магистрали / С. С. Куков, А. В. Гриценко // Вестник КрасГАУ. – 2009. – № 3(30). – С. 143-147.

19. Куков, С. С. Диагностирование коренных подшипников коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания / С. С. Куков, А. В. Гриценко // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2009. – № 3. – С. 27-28.

20. Куков, С. С. Диагностирование системы смазки двигателя внутреннего сгорания / С. С. Куков, А. В. Гриценко // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2009. – № 1. – С. 33-34.

21. Бурцев, А. Ю. Повышение эксплуатационной надежности турбокомпрессоров дизелей тракторов / А. Ю. Бурцев, А. М. Плаксин, А. В. Гриценко // Достижения науки - агропромышленному производству: МАТЕРИАЛЫ LIV МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ; Челябинск, 29–31 января 2015 года / Под редакцией П.Г. Свечникова. Том II. – Челябинск: ЧГАА, 2015. – С. 27-33. – EDN TVGLST.

22. Gritsenko, A. V. Development of Measures to Prevent Surging Turbochargers of Cars / A. V. Gritsenko, V. D. Shepelev, A. V. Samartseva // Proceedings of the 4th International conference on industrial engineering ICIE 2018: Lecture notes in mechanical engineering, Москва, 15–18 мая 2018 года. – Москва: Springer International Publishing, 2019. – P. 861-871. – DOI 10.1007/978-3-319-95630-5_90. – EDN YTKKVV.

23. Гриценко, А. В. Контроль расхода масла современных турбокомпрессоров автомобиля КАМАЗ / А. В. Гриценко, А. Ю. Бурцев, И. Х. Гималтдинов // Современное состояние и перспективы развития технической базы агропромышленного комплекса: Научные труды Международной научно-практической конференции, посвященной памяти д.т.н., профессора

Мудрова П.Г., Казань, 28–29 октября 2021 года. – Казань: Казанский государственный аграрный университет, 2021. – С. 137-144. – EDN CTLG0B.

24. Гриценко, А. В. Диагностирование подшипников кривошипно-шатунного механизма по параметрам давления в центральной масляной магистрали / А. В. Гриценко, С. С. Куков // Достижения науки - агропромышленному производству: Материалы XLVIII Международной научно-технической конференции, Челябинск, 29–31 января 2009 года. Том 2. – Челябинск: ЧГАУ, 2009. – С. 9-15.

25. Способ и стенд для диагностирования турбокомпрессора ТКР-11 / А. В. Гриценко, А. М. Плаксин, И. Ганиев [и др.] // Вестник Таджикского технического университета. – 2014. – № 4(28). – С. 92-97. – EDN TYWIAL.