

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ СИСТЕМЫ СМАЗКИ ТУРБОКОМПРЕССОРОВ
С АВТОНОМНО-СМАЗОЧНЫМ ТОРМОЗНЫМ УСТРОЙСТВОМ

A.V. Gritsenko, A.Yu. Burtsev,
V.D. Shepelev, Z.V. Almetova

THE RESULTS OF PRODUCTION TESTS OF LUBRICATION SYSTEM OF TURBOCOMPRESSORS
WITH AUTONOMOUS AND LUBRICANT BRAKE MECHANISM

Гриценко А.В. – канд. техн. наук, доц. каф. автомобильного транспорта Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета), г. Челябинск. E-mail: alexgrits13@mail.ru

Бурцев А.Ю. – лаборант информационно-технического отдела филиала Кузбасского государственного технического университета им. Т.Ф. Горбачёва в г. Белово, Кемеровская обл., г. Белово, пгт. Инской. E-mail: burceval2009@yandex.ru

Шепелев В.Д. – канд. техн. наук, доц. каф. автомобильного транспорта Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета), г. Челябинск. E-mail: shepelevvd@susu.ru

Альметова З.В. – канд. техн. наук, доц. каф. автомобильного транспорта Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета), г. Челябинск. E-mail: almetovazv@susu.ru

Gritsenko A.V. – Cand. Techn. Sci., Assoc. Prof., Chair of Motor Transport, Southern Ural State University (National Research University), Chelyabinsk. E-mail: alexgrits13@mail.ru

Burtsev A.Yu. – Laboratory Assistant, Information and Technical Department, Branch of Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev, Belovo, Kemerovo Region, Mr. Belovo, stt. Inskoy. E-mail: burceval2009@yandex.ru

Shepelev V.D. – Cand. Techn. Sci., Assoc. Prof., Chair of Motor Transport, Southern Ural State University (National Research University), Chelyabinsk. E-mail: shepelevvd@susu.ru

Almetova Z.V. – Cand. Techn.Sci., Assoc. Prof., Chair of Motor Transport, Southern Ural State University (National Research University), Chelyabinsk. E-mail: almetovazv@susu.ru

Выявлено, что установка гидроаккумулятора обеспечивает масляную подпитку подшипников ротора со штатными параметрами подачи и давления масла при резком сокращении оборотов коленчатого вала при перегрузках двигателя, но на 30–40 % увеличивает выбег ротора, предопределяя увеличение габаритов гидроаккумулятора. В режиме торможения воздушного потока заслонкой тормозного устройства увеличивается тормозной момент, что предопределяет замедление ротора турбокомпрессора и сокращает продолжительность выбега его ротора до величины, меньшей по сравнению с продолжительностью при свободном выбеге ротора со штатной системой смазки двигателя.

Были проведены эксплуатационные испытания 15 тракторов К-700А с двигателем ЯМЗ-238НБ, оснащенным турбокомпрессорами ТКР-11-238НБ. При исследовании со штатной системой смазки 95%-й доверительный интервал составил 3701; 4074 мото-ч. После установки в систему смазки турбокомпрессора автономного смазочно-тормозного устройства значение средней наработки на отказ превышает в 1,85 раза среднюю наработку на отказ при штатной системе смазки.

Ключевые слова: двигатель, турбокомпрессор, смазка, надежность, наработка, отказ.

It was revealed that installation of hydroaccumulator provides oil feed of bearings of the

rotor with regular parameters of giving and pressure of oil at sharp reduction of turns of crankshaft under engine overloads, but by 30–40 % increases rotor coast, predetermining the increase in dimensions of the hydroaccumulator. In the braking mode of air flow, the brake damper increases the braking torque, which determines the deceleration of the rotor of the turbocharger and shortens the run-up time of its rotor to a value lower than the duration with free run-out of the rotor with a regular engine lubrication system. Operational tests of 15 K-700A tractors with YaMZ-238NB engine equipped with TKR-11-238NB turbocompressors were carried out. At the research with regular lubrication system of 95 % confidential interval made 3701; 4074 the motor-h. After the installation of autonomous lubricating and braking device in the lubrication system of a turbocharger, the mean time between failures exceeds 1.85 times the average operating time for failure with a regular lubrication system.

Keywords: engine, turbocompressor, greasing, reliability, operating time, failure.

Введение. Значительный прирост мощности дизельных двигателей внутреннего сгорания (ДВС) обеспечивает применение турбонаддува. В то же время турбонаддув и, в частности, его самый нагруженный элемент – турбокомпрессор (ТКР) лимитирует ресурс всего ДВС. По ряду данных, снижение ресурсных параметров ТКР связано с недостаточным обеспечением подачи масла в рабочий зазор [1–3]. Основная причина масляного голодания заключается в периферийности расположения подшипникового узла ротора ТКР [4–7]. В то же время длительность процесса выбега ротора ТКР также содействует нарушению теплового режима работы [8–10]. Его продолжительность зависит от значительного числа факторов, перечисленных в приведенных литературных источниках [4, 6].

Для обеспечения постоянной подачи масла к подшипнику ТКР и уменьшения времени остановки ротора ТКР предлагается модернизация системы смазки ТКР, которая заключается в установке автономного смазочно-тормозного устройства (АСТУ).

Цель исследований. Сравнение наработки на отказ ТКР тракторов К-700А со штатной системой смазки и модернизированной применением АСТУ.

Задачи: разработать конструкцию автономного смазочно-тормозного устройства и модернизировать систему смазки турбокомпрессора ТКР-11-238НБ ДВС трактора К-700А; провести производственные испытания в условиях эксплуатации турбокомпрессоров ТКР-11-238НБ с использованием АСТУ на автотракторных двигателях; провести статистическую обработку и анализ полученных результатов производственных испытаний турбокомпрессоров ТКР-11-238НБ с использованием АСТУ на автотракторных двигателях.

Для проведения сравнения необходимо было произвести длительные наблюдения и воспользоваться теорией математической статистики для обработки данных [5].

Анализ ряда научных работ в области надежности автотракторных ДВС указывает на преобладающее количество статистических данных отказов по нормальному закону распределения [4, 6].

Наблюдаемые в эксплуатации данные по надежности ТКР с целью сокращения времени обрабатывались в программе SPSS Statistics 18. В методологии обработки использовался тест на нормальное распределение Шапиро-Уилкса. Если оцениваемый критерий показателя p для параметра N , характеризующий вероятность ошибки, больше или равен 0,05, распределение можно считать нормальным [5].

Методы и результаты исследований. Для выполнения первой задачи исследований была разработана конструкция автономного смазочно-тормозного устройства и проведена модернизация системы смазки турбокомпрессора ТКР-11-238НБ ДВС трактора К-700А. В результате чего получена конструкция системы смазки турбокомпрессора ДВС (рис. 1), которая содержит главную масляную магистраль 1 ДВС, напорный трубопровод 2, гидроаккумулятор 3 с расположенным в верхней его части подпружиненным пружиной 4 поршнем 5.

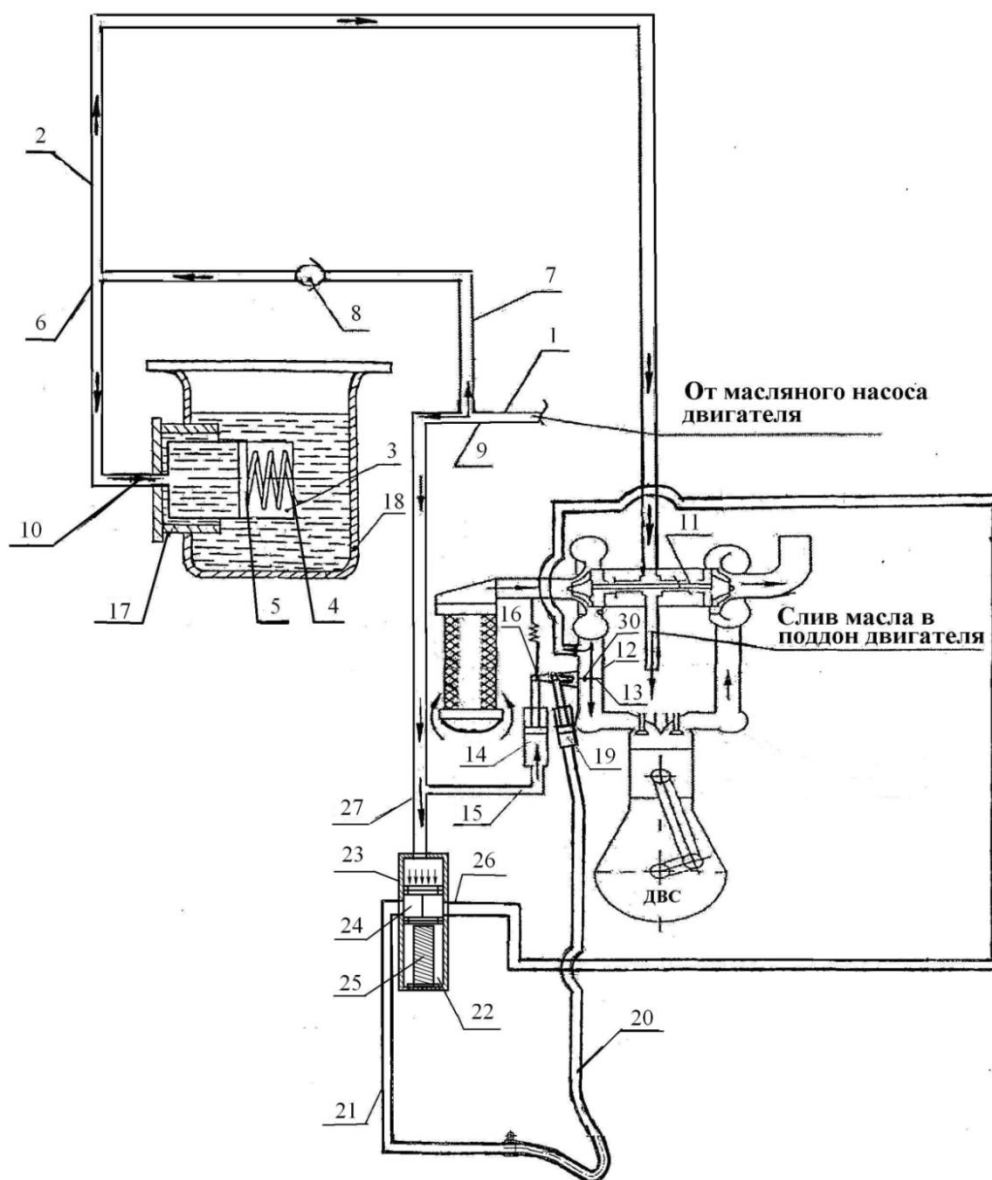


Рис. 1. Схема модернизированной системы смазки турбокомпрессора ДВС

Гидроаккумулятор соединен расположенным в нижней его части патрубком через установленный в нем тройник 6 входным патрубком 7 через обратный клапан 8 и тройник 9 с главной масляной магистралью 1 ДВС, а выходным патрубком 10 и напорным трубопроводом 2 – с подшипником 11 турбокомпрессора. Между турбокомпрессором и ДВС в воздушном патрубке 12, соединяющем турбокомпрессор и всасывающий патрубок ДВС, дополнительно установлено перекрывающее всасывающий воздушный патрубок ДВС тормозное устройство с перекрывающим элементом, представляющим собой поворотную заслонку 13 с гидроцилиндром 14, соединительной магистралью 15 и рычагом 16. Гидроаккумулятор 3 системы смазки турбокомпрессора вмонтирован в от-

сек 17 масляного поддона 18 ДВС. Привод поворотной заслонки 13 тормозного устройства имеет следящее устройство, включающее в себя пневмоцилиндр 19, соединенный посредством гибкого шланга 20, стальной трубки 21 с блокирующим клапаном 22. Блокирующий клапан 22, представляющий собой корпус 23 с установленными в нем поршнем 24 и пружиной 25, соединен с воздушной магистралью 26, а также подсоединен к главной масляной магистрали 1 при помощи трубки 27.

В поворотной заслонке 13 тормозного устройства, установленной на оси 28, выполненной с выходными отверстиями 29 (рис. 2), установлен тарельчатый противоаварийный клапан 30, состоящий из стержня 31 с тарелкой 32, шайбы 33 и регулировочных гаек 34, а также пружины 35.

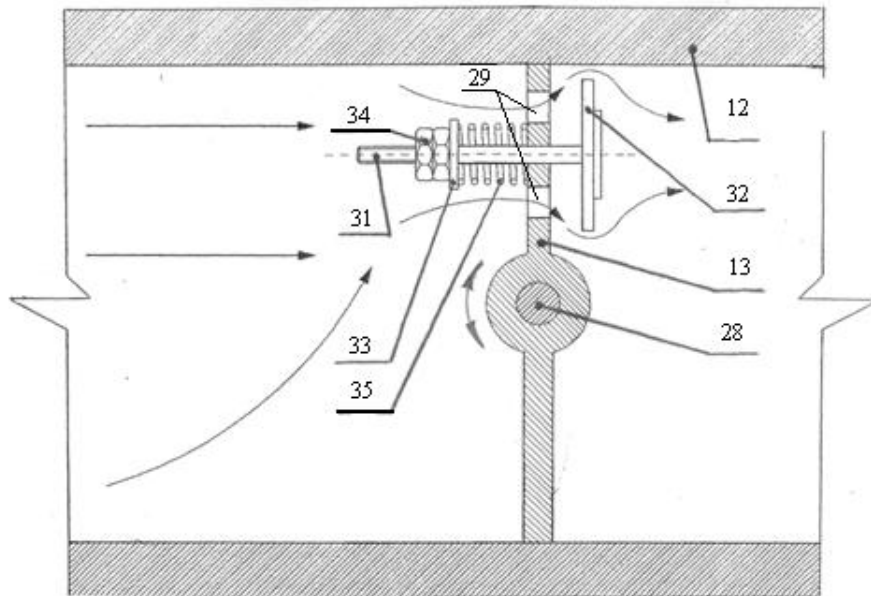


Рис. 2. Схема тормозной заслонки со встроенным противоаварийным клапаном

Гидроаккумулятор 3, установленный в корпус 17, встроен в масляный поддон 18 ДВС (см. рис. 1), что предотвращает влияние температуры окружающей среды (диапазон от -40 до $+40$ °С) на температуру масла в гидроаккумуляторе и сохраняет температуру масла (в результате теплообмена), равную температуре масла в системе смазки ДВС. При резком нарастании давления наддува пружина 35 штока 31 сжимается, и шток 31 с тарелкой 32 перемещаются, открывая выходные отверстия 29 (см. рис. 2). Противоаварийный тарельчатый клапан 30 позволяет исключить разрушение тормозного устройства и турбокомпрессора от помпажа в случае выхода из строя следящего устройства.

Обработка полученных данных производилась методами математической статистики и теории вероятностей [5]. В процессе обработки определялись количество и величина интервалов статистики, величина математического ожидания и коэффициент вариации. Первоначально производилось наблюдение статистики отказов узлов и элементов ТКР на тракторах К-700А, оснащенных штатной системой смазки. Для чего было выбрано 15 объектов наблюдения: тракторы К-700А с двигателем ЯМЗ-238НБ, имеющим в конструкции турбокомпрессор ТКР-11-238НБ. Фиксировались отказы узлов и элементов ТКР во времени. Нарботки до отказа ТКР тракторов К-700А с двигате-

лем ЯМЗ-238НБ, оснащенным турбокомпрессорами ТКР-11-238НБ со штатной системой смазки, составили 3650, 4260, 3850, 3530, 4250, 4180, 3580, 3550, 4280, 3700, 4330, 3780, 3880, 4200, 3300 мото-ч. Средняя наработка на отказ составила 3888 мото-ч, среднеквадратическое отклонение – 337 мото-ч, коэффициент вариации – 0,08. Стандартная ошибка $s = 87$ мото-ч, показатель точности $p = 2,23$ %.

На втором этапе исследований в систему смазки тракторов К-700А устанавливалось специально разработанное АСТУ. По аналогии с первой частью исследований также было выбрано 15 объектов испытаний. Результаты контроля отказов ТКР тракторов К-700А с двигателем ЯМЗ-238НБ, оснащенным турбокомпрессорами ТКР-11-238НБ с АСТУ: 6670, 7400, 7180, 7080, 7630, 7120, 7580, 6850, 6880, 7480, 7550, 6830, 7150, 7560, 6950 мото-ч. Средняя наработка на отказ составила 7194 мото-ч, среднеквадратическое отклонение – 319 мото-ч, коэффициент вариации – 0,04. Стандартная ошибка $s = 82$ мото-ч, показатель точности $p = 1,14$ %.

Полученные значения наработки до наступления отказа заносились в таблицы и обрабатывались при помощи программы PASW Statistics 18 [5]. Далее производили оценку данных по критерию нормальности и сводили полученные данные в таблице 1.

Оценка данных наблюдений по критерию нормальности для штатной системы смазки (кол-во объектов – 15 шт.)

Параметр оценки	Критерий нормальности, мото-ч			
	Колмогорова-Смирнова		Шапиро-Уилка	
	Статистика	Значимость	Статистика	Значимость
VAR00001	0,207	0,083	0,910	0,134

При сопоставлении значений полученного статистического критерия с его табличным значением установлено значение статистического критерия больше 0,05, следовательно, распределение

данных числа отказов ТКР подчиняется нормальному закону распределения.

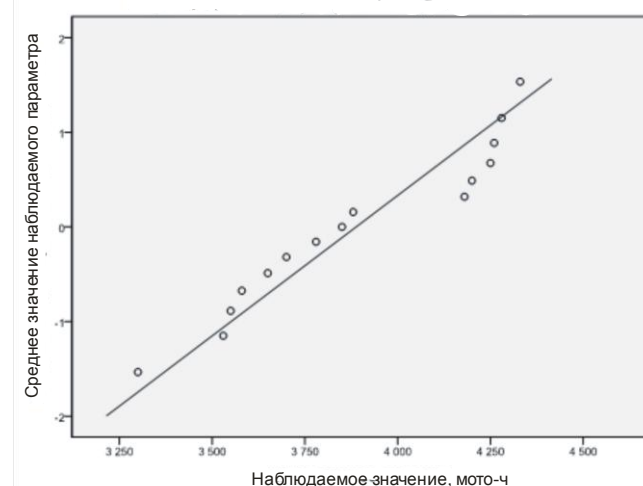
Далее производили оценку данных по критерию нормальности и сводили полученные данные в таблице 2.

Оценка данных наблюдений по критерию нормальности с АСТУ (кол-во объектов – 15 шт.)

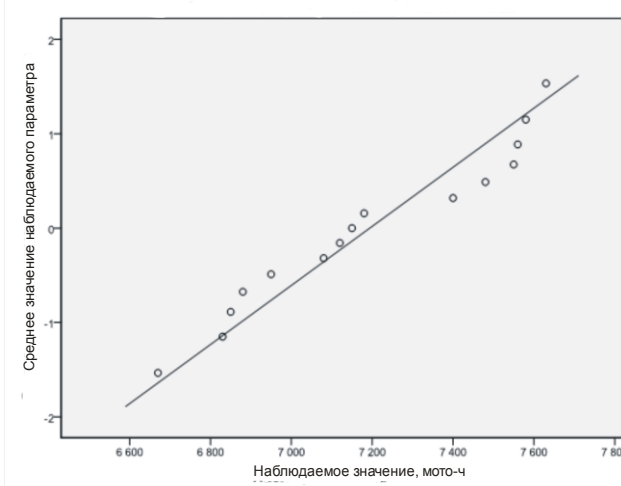
Параметр оценки	Критерий нормальности, мото-ч			
	Колмогорова-Смирнова		Шапиро-Уилка	
	Статистика	Значимость	Статистика	Значимость
VAR00002	0,148	0,200	0,923	0,211

При сопоставлении значений полученного статистического критерия с его табличным значением установлено значение статистического критерия

больше 0,05, следовательно, распределение данных числа отказов ТКР подчиняется нормальному закону распределения.



а



б

Рис. 3. Вероятностный график (квантили) распределения ресурса ТКР-11-238НБ: а – со штатной системой смазки; б – с АСТУ

При обработке данных получен вероятностный график (квантили) распределения ресурса ТКР-11-238НБ со штатной системой смазки (рис. 3, а) и оснащенной АСТУ (рис. 3, б). При анализе данных на рисунке 3 установлено, что значение средней наработки на отказ после установки АСТУ превышает в 1,85 раза среднюю наработку на от-

каз при штатной системе смазки. При этом 95 % доверительных интервалов не пересекаются.

Параллельно за наблюдением отказов ТКР производили их разборку и контроль зазора в подшипнике ТКР. Выборка при контроле зазора со штатной системой смазки ТКР составила 3 объекта наблюдения. И при установке АСТУ и модернизированной системе смазки также наблюдали за

тремя объектами. Контроль за шестью (3 с АСТУ и 3 со штатной системой) объектами и фиксацию износа поверхностей трения подшипников и цапф ротора ТКР проводили с помощью индикатора ИЧ 02 ГОСТ 577-68. Контроль дисбаланса и измерение осевого и радиального люфтов ротора осуществляли с помощью станка для балансировки роторов «Неотрон СБРТ-1500».

Результаты контроля трех ТКР-11-238НБ при межконтрольной наработке 500 мото-ч были сведены в контрольные таблицы (где №1, №2, №3 – порядковые номера объектов испытания). На основании чего построен график зависимости зазора Z , мкм, в подшипнике ТКР-11-238НБ с штатной системой смазки от наработки L , мото-ч (рис. 4).

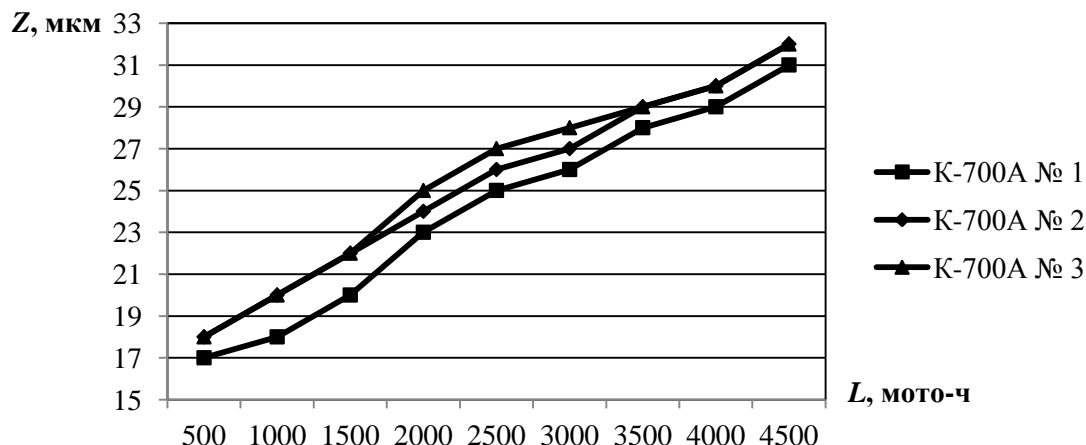


Рис. 4. Зависимость зазора Z , мкм, в подшипнике ТКР-11-238НБ со штатной системой смазки от наработки L , мото-ч

Из анализа данных рисунка 4 установлено: средняя наработка на отказ составляет 3888 мото-ч, что эквивалентно периодичности 8 ТО-2. При работе ТКР со штатной системой смазки в среднем после 7 ТО-2 наступит отказ турбокомпрессора.

Предварительные результаты контроля ТКР с АСТУ показали, что межконтрольная наработка до очередного ТО (при котором производится разборка ТКР и контроль его сопряжений) составила 1000 мото-ч. Полученные данные были сведены в таблицы (где №4, №5, №6 – порядковые номера объектов испытания), на основании кото-

рых построен график зависимости зазора Z , мкм, в подшипнике ТКР-11-238НБ с АСТУ от наработки L , мото-ч (рис. 5).

Анализ данных, представленных на рисунке 5, показывает: средняя наработка на отказ составляет 7194 мото-ч. После 14 ТО-2 наступит отказ турбокомпрессора. Следует отметить, что эксплуатационные испытания проводились в одинаковых климатических условиях при выполнении аналогичных сельскохозяйственных операций. Возрастные категории тракторного парка находились в рамках 1–3 лет с момента приобретения техники.

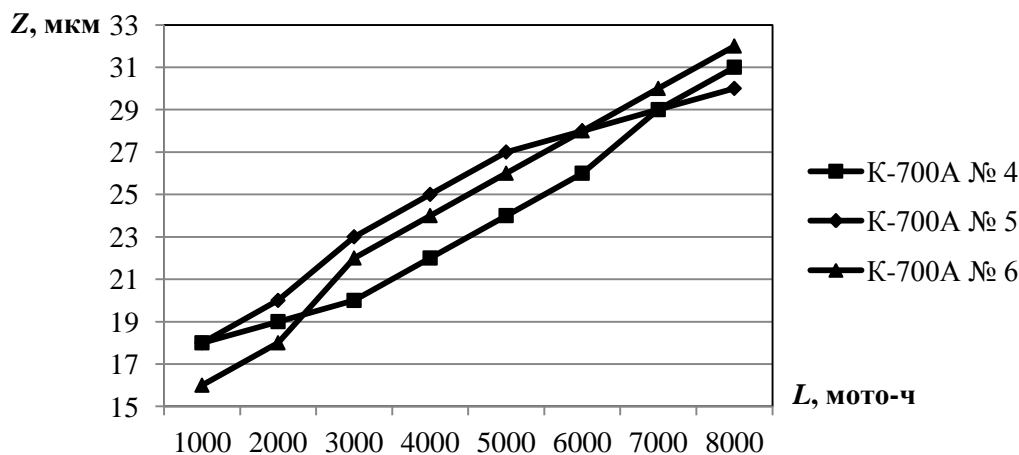


Рис. 5. Зависимость зазора Z , мкм, в подшипнике ТКР-11-238НБ с АСТУ от наработки L , мото-ч

Выводы. В результате проведенных эксплуатационных испытаний турбокомпрессоров ТКР-11-238НБ со штатной системой смазки установлено: средняя наработка на отказ составила 3888 мото-ч, что эквивалентно практически периодичности 8 ТО-2. Следовательно, при работе ТКР со штатной системы смазки в среднем после 7 ТО-2 наступит отказ турбокомпрессора. Проведенные эксплуатационные испытания после установки в систему смазки турбокомпрессора АСТУ показали: средняя наработка на отказ составила 7194 мото-ч. При этом в среднем после 14 ТО-2 наступит отказ турбокомпрессора, что в 1,85 раза превышает среднюю наработку на отказ при штатной системе смазки. При общих затратах на изготовление и установку АСТУ 10000–15000 рублей годовой экономический эффект составляет до 100000 руб на одно МЭС.

Литература

1. Денисов А.С., Малаховецкий А.Ф., Кулаков А.Т. [и др.]. Повышение эксплуатационной надежности турбокомпрессоров ТКР 7Н // Вестник СГТУ. – 2004. – № 1 (2). – С. 69–76.
2. Задорожная Е.А. Динамика и смазка неньютоновскими жидкостями сложнонагруженных трибосопряжений поршневых и роторных машин: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Челябинск, 2013. – 36 с.
3. Коркин А.А. Перспективы использования гидроаккумуляторов в системах смазки турбокомпрессоров // Механики – XXI веку. – Братск, 2008. – С. 284–285.
4. Малаховецкий А.Ф. Повышение безотказности турбокомпрессоров ТКР-7Н-1 // Совершенствование технологий и организации обеспечения работоспособности машин: межвуз. науч. сб. – Саратов: Изд-во Саратов. гос. техн. ун-та, 2004. – С. 8–13.
5. Многомерный статистический анализ в экономических задачах: компьютерное моделирование в SPSS: учеб. пособие / под ред. И.В. Орловой. – М.: Вузский учебник, 2009. – 310 с.
6. Носырев Д.Я., Свечников А.А., Становова Ю.Ю. Экспериментальные исследования работы турбокомпрессора в момент начала вращения и в момент остановки // Вестн. транспорта Поволжья. – 2014. – № 1 (43). – С. 15–19.

7. Рождественский Ю.В. Связанные задачи динамики и смазки сложнонагруженных опор скольжения: дис. ... д-ра техн. наук. – Челябинск, 1999. – 347 с.
8. Estupinan E.A., Santos I. Active lubrication strategies applied to dynamically loaded fluid film bearings // Proceedings of the World Tribology Conference. – Orland (FL), USA, 2009. – P. 46.
9. Forsthoffer B., Santos I.F. Turbocompressor performance condition monitoring // Forsthoffer's rotating equipment handbooks. – 2005. – Vol. 3. – P. 279–287.
10. Harnoy A. Bearing design in machinery: engineering tribology and lubrication. – New York: Marcel Dekker, 2003. – 440 p.

Literatura

1. Denisov A.S., Malahoveckij A.F., Kulakov A.T. [i dr.]. Povyshenie jekspluatacionnoj nadezhnosti turbokompressorov TKR 7N // Vestnik SGTU. – 2004. – № 1 (2). – S. 69–76.
2. Zadorozhnaja E.A. Dinamika i smazka nen'jutonovskimi zhidkostjami slozhnonagruzhennyh tribosoprjazhenij porshnevyyh i rotornyh mashin: avtoref. dis. ... d-ra tehn. nauk. – Cheljabinsk, 2013. – 36 s.
3. Korkin A.A. Perspektivy ispol'zovaniya gidroakkumuljatorov v sistemah smazki turbokompressorov // Mehaniki – XXI veku. – Bratsk, 2008. – S. 284–285.
4. Malahoveckij A.F. Povyshenie bezotkaznosti turbokompressorov TKR-7N-1 // Sovershenstvovanie tehnologij i organizacii obespechenija rabotosposobnosti mashin: mezhvuz. nauch. sb. – Saratov: Izd-vo Sarat. gos. tehn. un-ta, 2004. – S. 8–13.
5. Mnogomernyj statisticheskij analiz v jekonomicheskikh zadachah: komp'juternoe modelirovanie v SPSS: ucheb. posobie / pod red. I.V. Orlovoj. – M.: Vuzovskij uchebник, 2009. – 310 s.
6. Nosyrev D.Ja., Svechnikov A.A., Stanovova Ju.Ju. Jeksperimental'nye issledovanija raboty turbokompressora v moment nachala vrashhenija i v moment ostanovki // Vestn. transporta Povolzh'ja. – 2014. – № 1 (43). – S. 15–19.
7. Rozhdestvenskij Ju.V. Svjazannye zadachi dinamiki i smazki slozhnonagruzhennyh opor

- skol'zhenija: dis. ... d-ra tehn. nauk. – Cheljabinsk, 1999. – 347 s.
8. *Estupinan E.A., Santos I.* Active lubrication strategies applied to dynamically loaded fluid film bearings // Proceedings of the World Tribology Conference. – Orland (FL), USA, 2009. – P. 46.
9. *Forsthoffer B., Santos I.F.* Turbocompressor performance condition monitoring // Forsthoffer's rotating equipment handbooks. – 2005. – Vol. 3. – P. 279–287.
10. *Harnoy A.* Bearing design in machinery: engineering tribology and lubrication. – New York: Marcel Dekker, 2003. – 440 p.

