

УДК 536+537; 621.43:629.113/114/115; 621.892:662.75.004

DOI 10.18698/0536-1044-2017-3-76-88

Исследование возможности применения магнитных и электростатических полей для борьбы с осадкообразованием в авиационных моторных маслах двигателей, энергоустановок и техносистем наземного, воздушного и аэрокосмического базирования

В.А. Алтунин¹, К.В. Алтунин¹, И.Н. Алиев², А.А. Щиголев¹, А.А. Юсупов¹

¹ КНИТУ им. А.Н. Туполева — КАИ, 420111, Казань, Российская Федерация, К. Маркса, ул., д. 10

² МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

Researching the Possible Use of Magnetic and Electrostatic Fields to Address the Problem of Deposit Formation in Aviation Oils for Engines, Power Plants and Technical Systems of Aircraft for Aerial and Aerospace Use

V.A. Altunin¹, K.V. Altunin¹, I.N. Aliev², A.A. Shchigolev¹, A.A. Yusupov¹

¹ Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI, 420111, Kazan, Russian Federation, K. Marx St., Bldg.10

² BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1

@ e-mail: altspacevi@yahoo.com

i Рассмотрены проблемы систем смазки поршневых и газотурбинных двигателей и энергоустановок летательных аппаратов и техносистем других объектов наземного, воздушного и аэрокосмического применения. Одной из основных проблем является негативный процесс осадкообразования, что может привести к возникновению аварийной ситуации. Приведена классификация существующих и перспективных способов борьбы с твердыми углеродистыми отложениями в системах смазки. Выдвинуто предположение о возможности применения магнитных и электростатических полей в моторных авиационных маслах для интенсификации теплоотдачи и предотвращения осадкообразования в них. Проанализированы результаты экспериментального исследования тепловых процессов в авиационных моторных маслах без применения и с применением магнитных и электростатических полей. Результаты исследования введены в классификацию новых способов борьбы с осадкообразованием в авиационных моторных маслах. Даны рекомендации по применению электростатических полей в новых системах смазки двигателей, энергоустановок и техносистем различного назначения и базирования.

Ключевые слова: электрический ветер, соосные иглы, авиационные моторные масла, естественная конвекция, коэффициент теплоотдачи, борьба с осадкообразованием.

i This paper examines the problems occurring in lubrication systems of piston and gas turbine engines, power plants of aircraft, and technical systems of other objects with land, aerial and aerospace application. One of the main problems is the negative process of deposit formation that can lead to emergencies. The existing and promising methods of reducing solid hydrocarbon deposit formations in lubrication systems are classified. It is proposed that magnetic and electrostatic fields could be used in aviation oils to intensify heat transfer and prevent hydrocarbon deposit formation. The results of experimental studies of heat transfer processes in aviation engine oils with and without the application of magnetic and electrostatic fields are analyzed. The results of the research are introduced to the classification of new methods of preventing deposit formation in aviation engine oils. Recommendations concerning the use of electrostatic fields in new lubrication systems of engines, power plants and technical systems of various application and deployment are given.

Keywords: electric wind, coaxial needles, aviation engine oils, natural convection, heat transfer coefficient, prevention of deposit formation.

При работе поршневых двигателей внутреннего сгорания (ДВС), газотурбинных двигателей (ГТД) и энергоустановок (ЭУ) летательных аппаратов (ЛА) и техносистем (ТС) других объектов наземного, воздушного и аэрокосмического назначения и применения происходит нагрев не только ДВС, ГТД, ЭУ, ТС, но и их систем смазки. Моторные масла (ММ) при этом находятся в сложных термодинамических условиях, вследствие чего возникает множество проблем, связанных с потерей технических, физических, теплофизических и других свойств ММ. Одной из главных проблем является негативный процесс осадкообразования, происходящий в масляных каналах, форсунках и фильтрах, как в земных, так и в космических условиях. Вследствие осадкообразования понижаются плановый и расчетный ресурсы двигателей, ЭУ и ТС, происходит неожиданный внезапный выход из строя как масляной системы, так и двигателя, ЭУ и ТС в целом, а значит, и всего ЛА или другого объекта, содержащего ТС (различного транспорта, энергетики, специальных устройств и т.д.). Поэтому вопросы борьбы с осадкообразованием в системах смазки двигателей, ЭУ и ТС являются актуальными [1–10].

Поскольку существующие способы и методы борьбы с осадкообразованием являются неэффективными и затратными [9–11], необходимо разрабатывать новые, которые позволят уменьшить, удалить и предотвратить углеродистый осадок в системах смазки двигателей, ЭУ ЛА и ТС других объектов. На основе анализа научно-технической литературы установлено, что осадкообразование носит электрический характер [12, 13], поэтому автором В.А. Алтуниным было выдвинуто предположение о возможности управления заряжен-

ными частицами и диполями (участниками этого процесса) внешними магнитными (H) и электростатическими (E) полями. С помощью созданной экспериментальной базы и рабочих участков проведены исследования при естественной конвекции авиационных ММ без влияния и с влиянием H и E .

Существующие и перспективные способы и методы борьбы с осадкообразованием в системах смазки двигателей и ЭУ ЛА и ТС других объектов. Существующие способы и методы борьбы с осадкообразованием в ММ для двигателей и ЭУ ЛА и ТС других объектов [12, 13] подразделяют на три группы:

- 1) *предотвращающие осадок:*
 - применение специальных антиокислительных, антиосадкообразующих, моющих и других присадок;
 - правильный выбор ММ;
 - осуществление контроля за масляными фильтрами;
- 2) *уменьшающие осадок:*
 - своевременная смена фильтрующих элементов;
 - выбор металла (для изготовления деталей, контактирующих с ММ) с наименьшей скоростью осадкообразования на их поверхностях;
 - удаление кислорода воздуха из масляной системы;
 - плановая замена отработанного ММ на новое;
 - осуществление контроля за масляными фильтрами;
- 3) *удаляющие осадок:*
 - промывка систем смазки специальными моющими жидкостями (без разборки и с разборкой);

- механическая очистка деталей и каналов масляной системы от осадка (с разборкой);
- промывка каналов масляной системы с помощью специальных жидкостей на установке с термоакустическими автоколебаниями (ТААК) давления (с разборкой);
- выжигание твердого углеродистого осадка в богатом пламени метана;
- своевременная смена фильтрующих элементов;
- замена закоксованных деталей и агрегатов масляной системы на новые;
- плановая замена отработанного ММ на новое;
- осуществление контроля за масляными фильтрами;
- очистка ММ с помощью *H* и *E*.

Однако применение различных антиосаждообразующих присадок возможно только до температуры масла или нагреваемых стенок каналов 473 К. При ее дальнейшем повышении осадок начинает появляться и расти. Остальные способы и методы являются малоэффективными и очень затратными по временным, технологическим и экономическим показателям, связанным также и со снятием двигателей, ЭУ и ТС, с их отправкой на ремонтный завод и вынужденным простоем ЛА или других объектов.

Промывка масляных каналов различными моющими и специальными средствами (с применением или без применения ТААК давления) полностью не удаляет твердый углеродистый осадок, а другие детали масляных систем не могут быть очищены таким способом. Использование механической очистки различными устройствами и инструментами также не полностью решает данную задачу. Кроме того, некоторые детали деформируются с образованием микротрещин, а мелкие закоксованные детали (например, масляные форсунки) чаще всего заменяют на новые. Выжигание твердого осадка в богатом пламени метана способствует не только очистке, например, съемных масляных каналов, но и их короблению, нарушению прочности и мест пайки, образованию микротрещин. Остается проблема полной очистки внутренних (несъемных) каналов и деталей масляных систем двигателей и ЭУ ЛА, ТС других объектов. Существующая система контроля способна следить за температурой и давлением в системах смазки (преимущественно в фильтрах), но не за появлением углеродистого осад-

ка и его ростом в масляных каналах и форсунках. Отсутствуют эффективные системы пассивной и активной борьбы с осадком по его предотвращению, уменьшению, ограничению и удалению без разборки двигателей и ЭУ ЛА, ТС других объектов.

Перспективные способы и методы борьбы с осадкообразованием в ММ для поршневых ДВС, ГТД, ЭУ ЛА и ТС других объектов [12, 13] также подразделяют на три группы:

- 1) *предотвращающие осадок*:
 - разработка новых ММ с высокими свойствами по границе высокотемпературного разложения;
 - создание новых антиосаждообразующих присадок, способных защитить ММ от осадка при температуре нагрева более 573 К;
 - разработка новых устройств по охлаждению нагреваемых деталей масляных систем до температуры ниже 373 К;
 - применение *E*;
- 2) *уменьшающие (и ограничивающие) осадок*:
 - использование контактирующих с ММ металлических поверхностей, выполненных в виде конусной резьбы с высотой зубьев 2...5 мм (рост осадка ограничен на высоте зубьев);
 - создание электроизолирующего слоя на поверхностях металлических деталей, контактирующих с ММ (конструктивно-технологический метод);
 - использование *E*;
- 3) *удаляющие осадок, основанные на конструктивных изменениях* (конструктивные методы):
 - создание резервных каналов, форсунок и фильтров;
 - применение (для каналов и форсунок) внутренних соосных игл в целях контроля за образованием и удалением осадка;
 - использование гофрированных масляных каналов, выполненных из металлов с «памятью форм», которые при нагреве (или остывании) будут сжиматься или разжиматься, разрушая при этом слой твердого углеродистого осадка;
 - применение гофрированных металлических масляных каналов, сжимаемых и разжимаемых (для удаления осадка) с помощью специального устройства в ручном, полуавтоматическом и автоматическом режимах.

Обоснование необходимости проведения экспериментальных исследований по влиянию *H*

и E на тепловые процессы в ММ. Согласно теории Г.Ф. Большакова [12, 13], все углеводородные жидкости до температуры 313 К являются диэлектриками. При повышении температуры до 373 К в них возникают положительно и отрицательно заряженные частицы и такие жидкости становятся электропроводными средами. При дальнейшем увеличении температуры в них образуются диполи, которые активно участвуют в процессе осадкообразования. Известно [12, 13], что любые металлические поверхности (даже полированные) имеют микронеровности, на остриях которых всегда присутствуют заряды с чередующимися знаками (по Шоттки и Френкелю). При нагреве ММ до температур более 373 К диполи притягиваются к противоположным зарядам на микроостриях поверхности металлических деталей, образуя слой углеродистого осадка. Этот процесс в полной мере относится и к ММ нефтяного происхождения. Автором В.А. Алтуниным было выдвинуто предположение о возможности управления заряженными частицами и диполями в нагретых минеральных и синтетических ММ магнитными и электростатическими полями в целях предотвращения процесса осадкообразования на металлических поверхностях деталей систем смазки поршневых ДВС, ГТД и ЭУ ЛА, ТС других объектов различного назначения и базирования.

Известно, что H и E нашли широкое применение в науке и технике. В ММ такие поля используют в основном для их очистки от различных механических металлических частиц и продуктов эксплуатации двигателей и ЭУ, для предэксплуатационной подготовки, восстановления свойств и срока службы ММ [11–15].

Исследования теплоотдачи и осадкообразования в ММ проводили К.К. Папок, К.И. Климов, А.Е. Трянов, Н.Ф. Дубовкин, Т.Н. Шигабиев, Л.С. Яновский, Ф.М. Галимов, В.Ф. Иванов, А.А. Харин, Г.И. Чередниченко, А.Ф. Аксёнов, А.А. Алексашин, С.В. Дунаев, Г.Ф. Большаков, В.Г. Семёнов, М.И. Дасковский, Е.А. Денисов, В.А. Степанов, Е.А. Дубовик, А.С. Карасев, В.П. Коваленко, В.Н. Понькин, В.В. Рощин, К.В. Рыбаков, В.В. Лашхи, А.Б. Виппер, В.В. Кулагин и другие ученые [12, 13].

Исследования влияния полей H и E на тепловые процессы в различных средах, а также в подсолнечном, касторовом, трансформаторном маслах выполняли Р.Ф. Бабой, М.К. Болога, Г.А. Остроумов, Ю.Я. Иоссель, К.Н. Семёнов,

И.И. Берил, Н.А. Потапов, Ф.П. Гросу, И.А. Кожухарь, Ю.Н. Бубнов и др. [11–13].

Отсутствуют также работы и патенты на изобретения по влиянию H и E на интенсификацию теплоотдачи к авиационным ММ и предотвращение осадкообразования в них.

Цель работы — экспериментальное исследование возможности влияния H и E на тепловые процессы, возникающие в авиационных ММ при их естественной конвекции.

Результаты экспериментальных исследований. Для проверки выдвинутого предположения создана установка по естественной конвекции ММ (где их массовая скорость прокачки $\rho w = 0$), состоящая из экспериментальной бомбы с окнами визуализации и системы повышения давления и контроля. Рабочий участок представлял собой крышку с двумя токовводами, на концах которых закрепляли сменную рабочую пластину размером 0,2×2,0×50,0 мм из нержавеющей стали марки 1X18H10T с приваренной термопарой. В исследованиях использовали авиационные ММ марок МС-8П, ВНИИ НП 50-1-4У и МС-20. Давление ММ в экспериментальной бомбе изменялось в интервале $p = 0,1...5,0$ МПа. Начальная температура ММ $T_{м0} = 293$ К. Используемые в экспериментах магниты проходили тарировку с помощью прибора Холла и устанавливались на различных расстояниях от поверхности рабочей пластины. Расстояние между остриями рабочих соосных игл изменялось в диапазоне $h = 5...15$ мм, а подаваемое на отдающую рабочую соосную иглу электростатическое напряжение — $U_{и} = 5...30$ кВ. Температура нагрева сменной рабочей пластины $T_{пл} = 293...550$ К и более.

В экспериментальную бомбу заливали порцию ММ, устанавливали рабочий участок, герметично завинчивали наружную крышку, выставляли необходимое давление и подавали Джоулево тепло для нагрева рабочей пластины. Каждый эксперимент длился 10 мин при фиксированных и постоянных рабочих параметрах. Все тепловые процессы внутри бомбы через окна визуализации фиксировали на цветную и черно-белую кино- и фотопленку с помощью оптической установки Теплера. После опыта рабочий участок вынимали и проводили обследование рабочей пластины на предмет наличия осадкообразования. Для выполнения следующего эксперимента в бомбу заливали новую порцию ММ.

Первый цикл исследований проводили без влияния H и E , а второй — с их влиянием.

При исследовании влияния H на тепловые процессы, возникающие в ММ, около пластины (в различных комбинациях и на разных расстояниях) устанавливали заранее протестированные постоянные и электрические магниты. При исследовании влияния E над и под пластиной на различном фиксированном расстоянии h закрепляли рабочие соосные иглы, одна из которых являлась отдающей, а другая — принимающей. Система игла-игла выбрана по двум причинам: во-первых, такая система порождает возникновение электрического ветра (разновидности E), развивает его эффективное гидродинамическое влияние в жидких и газообразных средах, а во-вторых, она позволяет сравнить полученные данные с результатами других авторов, которые также использовали эту систему рабочих игл.

Результаты первого цикла опытов показали, что образование углеродистого осадка происходит на всей поверхности рабочей пластины, а результаты второго — что H практически не влияют на теплоотдачу и осадкообразование в ММ, а E оказывают значительное влияние. Поэтому далее будем рассматривать только результаты влияния E .

Экспериментально установлено, что электрический ветер существенно уменьшает температуру рабочей горячей пластины $T_{пл}$. На рис. 1 приведен пример снижения температу-

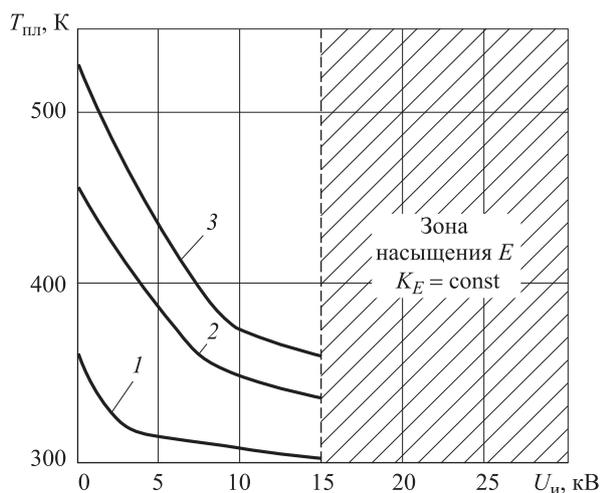


Рис. 1. Влияние электростатического напряжения $U_{и}$ на температуру рабочей пластины $T_{пл}$ в ММ марки МС-8П при расстоянии $h = 5$ мм и различных значениях плотности теплового потока: $q = 2 \cdot 10^4$ (1), $6 \cdot 10^4$ (2), $10 \cdot 10^4$ (3) Вт/м²

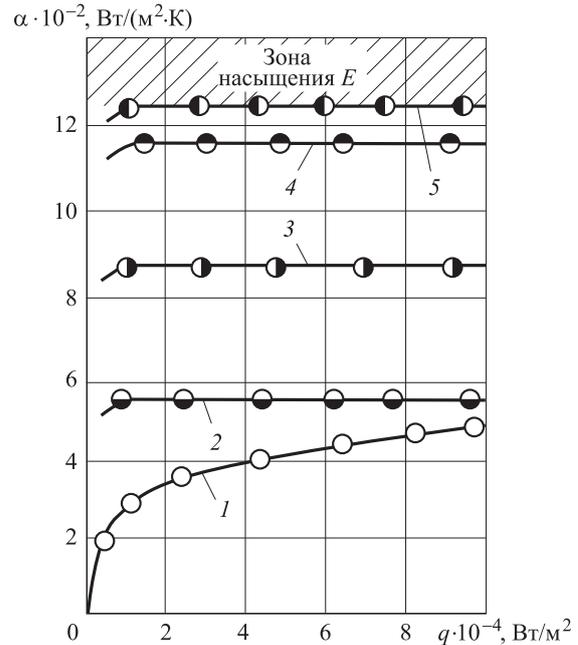


Рис. 2. Зависимость коэффициента теплоотдачи α к ММ марки ВНИИ НП 50-1-4У от плотности теплового потока q при расстоянии $h = 10$ мм и различных значениях электростатического напряжения: $U_{и} = 0$ (1), 5 (2), 10 (3), 15 (4), 20 (5) кВ

ры $T_{пл}$ по мере увеличения электростатического напряжения $U_{и}$, подаваемого на отдающую рабочую иглу, при расстоянии между остриями рабочих соосных игл $h = 5$ мм и различных значениях плотности теплового потока q .

Снижение температуры рабочей пластины означает повышение коэффициента теплоотдачи к ММ. На рис. 2 приведена зависимость коэффициента теплоотдачи α к ММ марки ВНИИ НП 50-1-4У от плотности теплового потока q и электростатических напряжений $U_{и}$ при расстоянии $h = 10$ мм.

В ходе исследования обнаружено, что влияние электрического ветра не всегда является эффективным. Экспериментально установлены зона и границы возможного эффективного применения E в условиях естественной конвекции различных ММ (рис. 3), где при увеличении электростатического напряжения $U_{и}$ коэффициент теплоотдачи к ММ также возрастает. В зоне насыщения E дальнейшее повышение напряжения $U_{и}$ уже не приводит к ожидаемому росту коэффициента теплоотдачи, он становится постоянным.

Влияние плотности теплового потока q на относительный коэффициент теплоотдачи к ММ при различных значениях электростатиче-

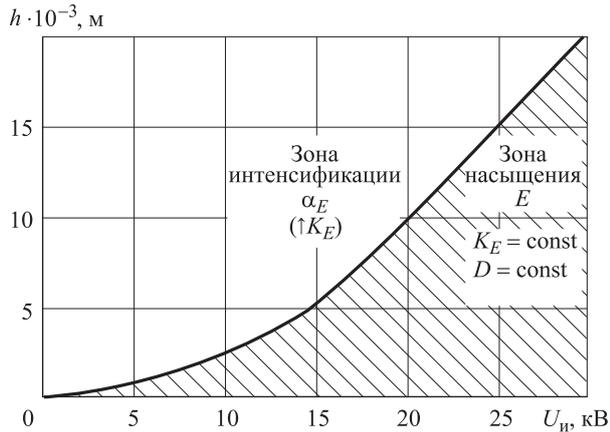


Рис. 3. Зона возможной интенсификации теплоотдачи к ММ в условиях их естественной конвекции при влиянии E (до зоны насыщения E)

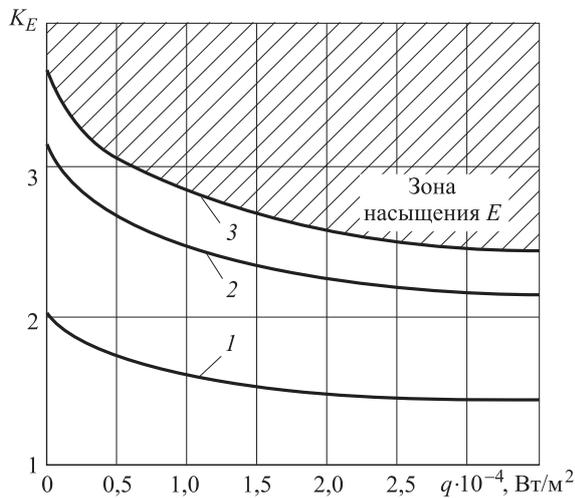


Рис. 4. Влияние плотности теплового потока q на относительный коэффициент теплоотдачи K_E к ММ марки МС-20 при расстоянии $h = 5$ мм и различных значениях электростатического напряжения: $U_n = 5$ (1), 10 (2), 15 (3) кВ

ского напряжения показано на рис. 4. Относительный коэффициент теплоотдачи $K_E = \alpha_E / \alpha_0$, где α_E и α_0 — коэффициенты теплоотдачи с применением E и без применения E .

Как видно из рис. 4, увеличение относительного коэффициента K_E происходит только в зоне возможной интенсификации теплоотдачи.

Влияние электростатического напряжения на относительный коэффициент теплоотдачи к ММ марки МС-8П показано на рис. 5, из которого следует, что при расстоянии $h = 15$ мм и различной плотности теплового потока q зона насыщения E наступает, когда напряжение $U_n = 25$ кВ, далее относительный коэффициент K_E принимает постоянные значения.

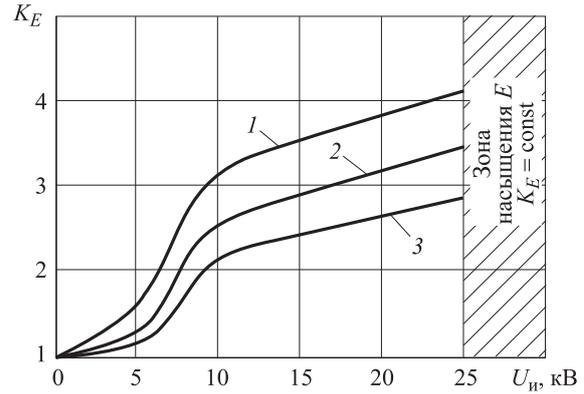


Рис. 5. Влияние электростатического напряжения U_n на относительный коэффициент теплоотдачи K_E к ММ марки МС-8П при расстоянии $h = 15$ мм и различных значениях плотности теплового потока: $q = 2 \cdot 10^4$ (1), $6 \cdot 10^4$ (2), $10 \cdot 10^4$ (3) Вт/м²

Экспериментально установлено, что E способны не только интенсифицировать теплоотдачу к авиационным ММ, но и предотвращать осадкообразование в их объеме на нагреваемой рабочей пластине в зоне прохождения силовых линий в системе игла-игла при любых давлениях в экспериментальной бомбе (рис. 6).

Значения диаметра воображаемой окружности без осадка D (или расстояние между внешними силовыми линиями E), образованного системой игла-игла, можно определить для авиационных ММ с помощью экспериментального графика, приведенного на рис. 7.

В зоне насыщения E (см. рис. 3 и 7) значения этого диаметра для каждого фиксированного

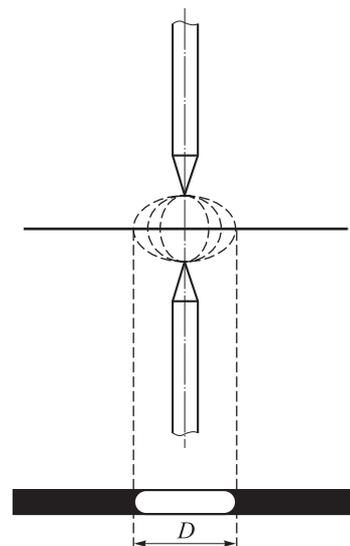


Рис. 6. Предотвращение осадка на нагреваемой рабочей пластине в зоне прохождения силовых линий E , образованных системой игла-игла

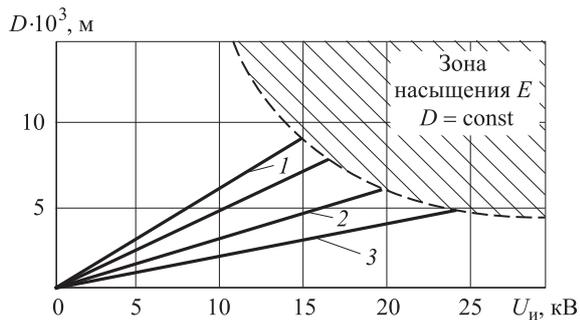


Рис. 7. Влияние электростатического напряжения U_n на диаметр D площади поверхности рабочей нагреваемой пластины, предотвращенной от процесса осадкообразования, в условиях естественной конвекции авиационных ММ при различных значениях расстояния между остриями рабочих соосных игл: $h = 5$ (1), 10 (2), 15 (3) мм

расстояния между соосными иглами h будут постоянными. Поэтому применение E включено авторами в группу перспективных способов и методов борьбы с осадкообразованием, предотвращающих этот негативный процесс.

В ходе экспериментов установлено, что осадок появляется на поверхности пластины при включении E в работу как после ее нагрева, так и с интервалом 0,5...5,0 с без изменения или с изменением полярности на рабочих иглах.

Включение E в постоянном режиме после некоторого нагрева рабочей пластины в ММ и появления слоя осадка на ее поверхности, а также включение E в импульсном режиме приведет к затормаживанию и уменьшению процесса осадкообразования в зоне прохождения силовых линий. Поэтому применение E введено авторами в группу перспективных способов и методов, уменьшающих (и ограничивающих) рост осадка.

Следует отметить, что при импульсном режиме включения E увеличения коэффициента теплоотдачи (или относительного коэффициента теплоотдачи) не происходит. Это связано с тем, что электрический ветер не успевает войти в режим релаксации.

Также необходимо отметить следующее:

- диаметр рабочих соосных игл (1...3 мм) и углы их заточки (15...85°) не влияют:

- на конфигурацию и распространение силовых линий E , а следовательно, и на диаметр площади рабочей пластины, предотвращенной от осадкообразования;

- на процесс интенсификации теплоотдачи к авиационным ММ;

- изменение давления в экспериментальной бомбе с авиационными ММ не влияет:

- на конфигурацию и распространение силовых линий E , т. е. на площадь пластины, предотвращенной от осадкообразования;

- на процесс интенсификации теплоотдачи к авиационным ММ электростатическими полями.

Рассмотрим более подробно варианты возможного появления углеродистого осадка на нагреваемых в авиационных ММ деталях системы смазки двигателей и ЭУ ЛА, ТС других объектов при различном влиянии E .

1. Если включить E в постоянном режиме до или в момент пуска двигателя либо ЭУ, ТС (рис. 8, а, точка A_0), а выключить E после их останова и охлаждения деталей масляной системы до температуры 373 К и менее, то осадкообразование на поверхностях металлических деталей в зоне прохождения силовых линий E будет предотвращено полностью. Этот вариант, показанный на рис. 8, а линией 1, является основным и включен в представленную классификацию как перспективный способ предотвращения осадкообразования в масляных системах двигателей, ЭУ и ТС различного назначения, применения и базирования.

Если включить E в постоянном режиме через несколько десятков минут после пуска двигателя или ЭУ, ТС, например, в точке B_0 , а выключить E после их останова и охлаждения деталей масляной системы до температуры 373 К и менее, то процесс осадкообразования будет прерван, что на рис. 8, а показано линией 2. Это означает, что нагреваемые детали масляной системы успеют покрыться слоем твердого углеродистого осадка, толщина $\delta_{ос}$ которого будет зафиксирована в зоне прохождения силовых линий E .

Если включить E в постоянном режиме через 1 ч и более после пуска двигателя или ЭУ, ТС, а выключить E после их останова и охлаждения деталей масляной системы до температуры 373 К и менее, например, в точках C_0 , D_0 и E_0 (см. рис. 8, а), то процесс осадкообразования будет прерван и прекращен на уровне линий 3, 4 и 5 соответственно. Отсюда следует, что чем позже будут включены E , тем толще будет слой твердого углеродистого осадка в зоне прохождения силовых линий E . Этот вариант введен в представленную классификацию как способ, уменьшающий (и ограничи-

вающий) рост слоя углеродистого осадка. Если E не включать (или даже не планировать в конструкции масляных систем двигателей и ЭУ ЛА, ТС других объектов), то процесс осадкообразования будет происходить, например, по линии $б$ (см. рис. 8, a).

2. Если включить E в импульсном или периодическом режиме (без смены или со сменой полярности на рабочих соосных иглах) до или в момент пуска двигателя либо ЭУ, ТС (рис. 8, $б$, точка A_0), то процесс осадкообразования в зоне прохождения силовых линий E будет происходить в 2 раза медленнее, чем в масляной системе без применения E , что на рис. 8, $б$ показано линиями 1 и $б$ соответственно. Этот вариант введен в представленную классификацию как

способ, уменьшающий осадкообразование в системах смазки двигателей и ЭУ ЛА, ТС других объектов.

3. Если включить E в периодическом или импульсном режиме через некоторое время после пуска двигателя или ЭУ (рис. 8, $в$, точка B_0), то нагреваемые детали масляной системы успеют покрыться слоем твердого углеродистого осадка, а в зоне прохождения силовых линий E слой углеродистого осадка будет расти в 2 раза медленнее, чем в масляной системе без применения или отключения E , что на рис. 8, $в$ показано линиями 2 и $б$ соответственно.

4. Если включить E в постоянном режиме до или в момент пуска двигателя либо ЭУ, ТС (рис. 8, $г$, точка A_0), а выключить E в ходе их

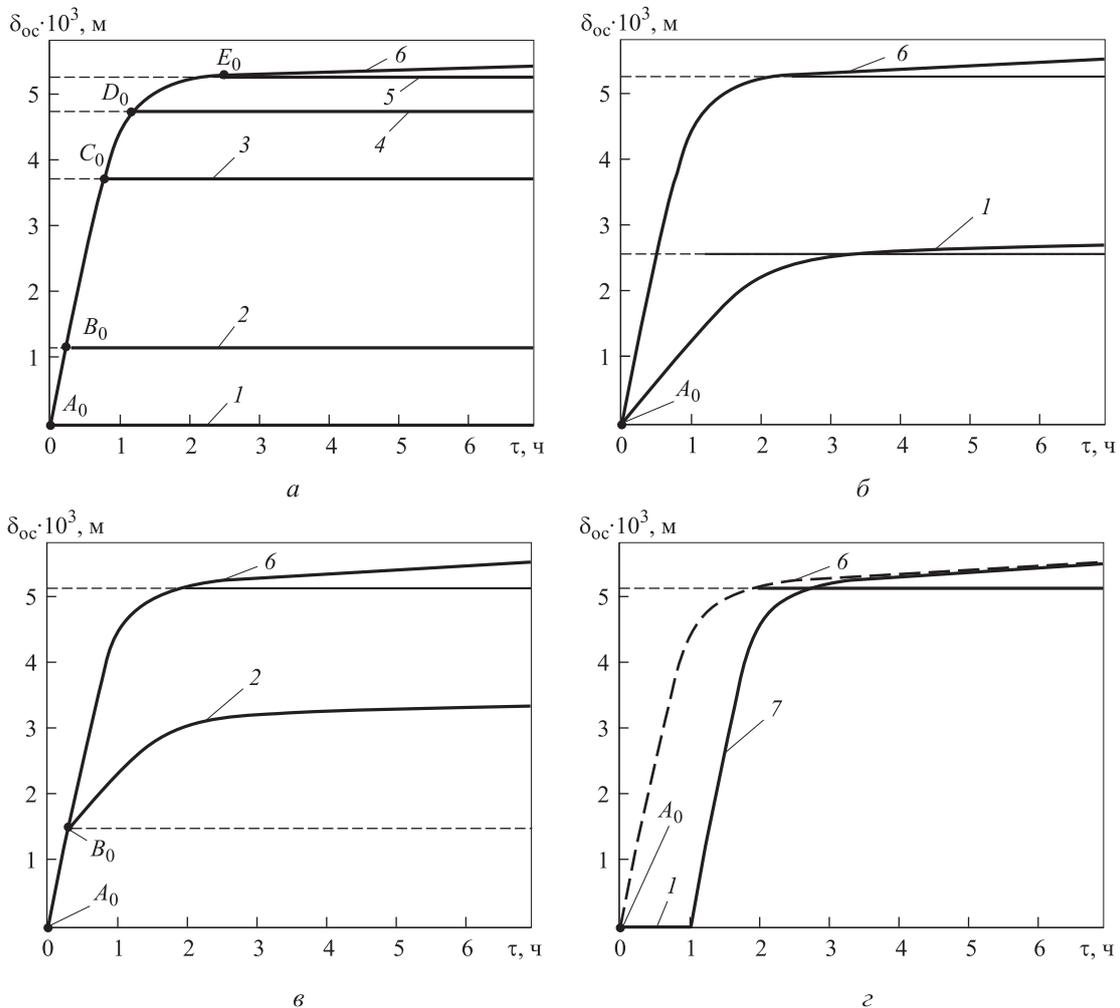


Рис. 8. Процесс осадкообразования на нагреваемых деталях в авиационных ММ в условиях их естественной конвекции:

a — при различном времени включения E относительно времени пуска двигателя или ЭУ, ТС с выключением E после их останова; $б$ — при включении E до или в момент пуска двигателя или ЭУ, ТС в импульсном или периодическом режиме без смены или со сменой полярностей на рабочих соосных иглах; $в$ — при позднем времени включения E относительно времени пуска двигателя или ЭУ, ТС в импульсном или периодическом режиме без смены или со сменой полярностей на рабочих соосных иглах; $г$ — при различном времени включения E относительно времени пуска двигателя или ЭУ, ТС с выключением E в ходе их работы

работы, например, через 1 ч, то в течение этого часа образование осадка будет предотвращено (в зоне прохождения силовых линий E), что на рис. 8, z показано линией 1. После отключения E начнется активный процесс осадкообразования, т. е. слоем углеродистого осадка будут покрываться и поверхности деталей масляной системы, где ранее проходили силовые линии E (линия 7). Как видно из рис. 8, z , отключение E приводит к уменьшению ресурса, работоспособности и эффективности масляной системы, что свидетельствует о нежелательности этой операции в период работы двигателя, ЭУ и ТС.

Анализ вариантов борьбы с твердым углеродистым осадком показал, что первый из них является самым эффективным.

При определении влияния E на осадкообразование в масляных системах двигателей и ЭУ ЛА, ТС других объектов необходимо учитывать все варианты. Поэтому можно предложить общую формулу расчета толщины слоя твердого углеродистого осадка

$$\delta_{oc} = \delta_{oc0}\tau_0 + \delta_{ocE}\tau_E + \delta_{ocE+0}\tau_{E+0},$$

где δ_{oc0} и δ_{ocE} — толщина слоя твердого углеродистого осадка без влияния E и с влиянием E (в зоне прохождения силовых линий E) в постоянном режиме; τ_0 и τ_E — время работы двигателя, ЭУ ЛА, ТС других объектов без влияния E и с влиянием E в постоянном режиме; δ_{ocE+0} и τ_{E+0} — толщина слоя твердого углеродистого осадка и время работы двигателя, ЭУ ЛА, ТС других объектов при влиянии E в периодическом или импульсном режиме.

Эта формула позволяет правильно оценить процесс осадкообразования и спланировать применение E в масляных системах двигателей или ЭУ ЛА, ТС других объектов, а также предусмотреть возникновение и рост δ_{oc} в экстренных ситуациях.

Рекомендации по использованию E при разработке, проектировании и создании новых систем смазки повышенных характеристик двигателей и ЭУ ЛА, ТС других объектов различного назначения и применения. При разработке, проектировании и создании новых систем смазки для двигателей и ЭУ ЛА, для ТС других объектов, в которых запланировано применение способов и методов борьбы с осадкообразованием, необходимо выполнять следующие рекомендации и этапы алгоритма.

1. Анализ тепловых режимов двигателей и ЭУ при их работе с выявлением, расчетом и прогнозированием возможных пределов нагрева масляных систем. При нагреве деталей и узлов системы смазки до 373 К и более необходимо организовывать борьбу с осадкообразованием, применяя существующие и перспективные способы и методы, удаляющие, уменьшающие (ограничивающие) и предотвращающие осадок, без влияния и влиянием E , а также гибридные способы.

2. При использовании E необходимо учитывать следующее:

- одним из эффективных способов увеличения коэффициента теплоотдачи и предотвращения осадкообразования является система рабочих электродов типа игла-игла при правильно выбранных расстояниях между иглами h и электростатических напряжениях на отдающей игле U_i в экспериментальной зоне возможного эффективного применения E ;

- рабочие соосные иглы можно размещать как внутри масляных каналов и деталей, так и снаружи под различными углами наклона (что очень важно, особенно для космических условий эксплуатации), а также в разных дополнительных системах охлаждения ответственных деталей и узлов систем смазки;

- при продольном расположении рабочих соосных игл с диаметром, равным 1...3 мм, внутри масляного канала необходимо, чтобы его внутренний диаметр был не менее 5 мм;

- включение E следует проводить одновременно с запуском (нагревом) двигателя, ЭУ, ТС, а выключение — через некоторое время после их отключения, а точнее — после охлаждения их и масляной системы до температуры ниже 373 К, для надежного и эффективного предотвращения осадкообразования в ответственных местах и деталях масляной системы;

- давление в системах смазки не влияет на интенсификацию теплоотдачи и предотвращение осадкообразования E ;

- диаметр рабочих соосных игл (1...3 мм) и углы их заточки (15...85°) не влияют: на конфигурацию и распространение силовых линий E , а следовательно, и на диаметр площади рабочей пластины, предотвращенной от осадкообразования; на процесс интенсификации теплоотдачи к авиационным ММ;

- возможно одновременное совмещение конструктивных методов борьбы с осадкообразованием без влияния E со способами борьбы с

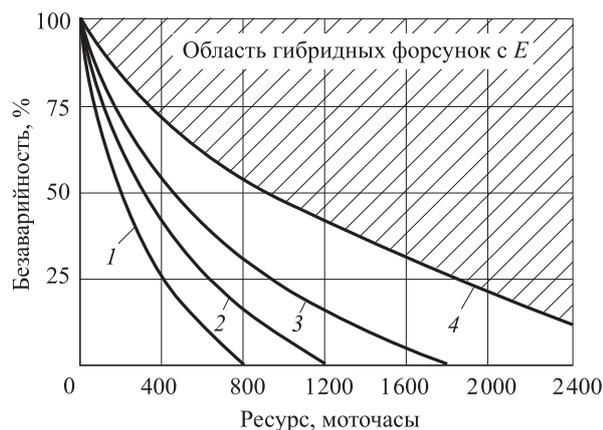


Рис. 9. Зависимость безаварийности от ресурса штатной (1) и новых масляных форсунок ГТД ЛА, обеспечивающих борьбу с осадкообразованием без применения E (2), с применением E (3) и гибридным способом (4)

использованием E , т. е. возможно применение гибридных способов и методов борьбы с осадкообразованием.

3. При разработке новых масляных систем двигателей, ЭУ ЛА и ТС других объектов возможно создание:

- новых масляных теплообменников и устройств подвода ММ к осевым подшипникам с E повышенных характеристик, так как вследствие влияния электрического ветра появляется возможность увеличения коэффициента теплоотдачи к ММ в 2–4 раза с одновременной организацией борьбы с осадкообразованием;

- масляных форсунок повышенных характеристик, в которых организована многогранная борьба с осадкообразованием при применении E (где одним из эффективных способов является гибридный), включая дополнительные системы охлаждения форсунок, в которых также применяют гибридные методы и способы предотвращения, уменьшения и удаления осадка. Для примера на рис. 9 показаны возможности новых форсунок ГТД ЛА;

- новых систем фильтрации и очистки ММ, совмещенных с системами восстановления и увеличения срока работоспособности ММ непосредственно в двигателях и ЭУ ЛА, в ТС других объектов различного базирования и применения;

- датчиков и устройств контроля за работой систем смазки двигателей, ЭУ ЛА, ТС других объектов различного базирования с применением E и выводом оперативных данных на инфор-

мационное табло летчика, космонавта, наземного оператора, а также в бортовой компьютер ЛА или в компьютер ТС наземного, воздушного, аэрокосмического базирования [12, 13].

4. При расчете влияния E на теплоотдачу и осадкообразование в авиационных ММ можно использовать экспериментальную базу данных (графики, таблицы) авторов или новые методики расчета, которые будут представлены в следующей статье.

Выводы

1. Проведен анализ существующих и перспективных способов и методов борьбы с осадкообразованием в системах смазки двигателей и ЭУ ЛА, ТС других объектов наземного, воздушного и аэрокосмического базирования.

2. Обоснована необходимость проведения экспериментальных исследований по влиянию H и E на тепловые процессы в авиационных ММ.

3. Представлены результаты экспериментальных исследований по влиянию H и E на тепловые процессы в авиационных ММ при их естественной конвекции. Выявлено, что H не влияют на теплоотдачу и осадкообразование в ММ, а E оказывают значительное влияние. Установлено, что электрический ветер способен увеличивать коэффициент теплоотдачи к авиационным ММ в 2–4 раза при различных условиях. Обнаружено, что E предотвращают осадкообразование на нагреваемой рабочей пластине в зоне прохождения силовых линий.

4. Даны рекомендации по использованию E при разработке, проектировании и создании новых систем смазки повышенных характеристик двигателей, ЭУ и ТС различного базирования, назначения и применения.

5. Материалы данной статьи могут быть полезны для разработчиков и конструкторов перспективных отечественных авиационных поршневых ДВС, ГТД, ЭУ и ТС наземного, воздушного и аэрокосмического базирования, назначения и применения повышенных характеристик по ресурсу, надежности, безопасности, экономичности и экологичности. Кроме того, представленные материалы можно широко использовать при проектировании и создании поршневых ДВС, ГТД, ЭУ и ТС в других отраслях промышленности, в экономике и науке.

Литература

- [1] Орлин А.С., Круглов М.Г., ред. *Двигатели внутреннего сгорания: устройство и работа поршневых и комбинированных двигателей*. Москва, Машиностроение, 1990. 228 с.
- [2] Агафонов А.Н., Сайданов В.О., Гудзь В.Н. *Комбинированные энергоустановки объектов малой энергетики*. Санкт-Петербург, Изд-во СПбГПУ, 2005. 262 с.
- [3] Кузьмин Н.А., Зеленцов В.В., Крупа В.В. Тепловое состояние, изнашивание и отложения в ДВС. *Известия Тульского государственного университета*, 2001, вып. 5, с. 58–61.
- [4] Зрелов В.А. *Отечественные газотурбинные двигатели. Основные параметры и конструктивные схемы*. Москва, Машиностроение, 2005. 336 с.
- [5] Гриценко Е.А., Данильченко В.П., Лукачев С.В., Резник В.Е., Цыбизов Ю.Н. *Конвертирование авиационных ГТД в газотурбинные установки наземного применения*. Самара, Изд-во СНЦ РАН, 2004. 266 с.
- [6] Боев А.А., Петрухин А.Г., Шкловец А.О. О перспективном подводе масла к подшипниковому узлу ГТД. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Механика и машиностроение*, 2013, т. 15, № 6(4), с. 1022–1026.
- [7] Елисеев Ю.С., Манушин Э.А., Михальцев В.Е., Суровцев И.Г., Осипов М.И. *Теория и проектирование газотурбинных и комбинированных установок*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 640 с.
- [8] Шигабиев Т.Н., Яновский Л.С., Галимов Ф.М., Иванов В.Ф. *Тепло- и массообмен при фазовых превращениях топлив и масел*. Казань, Изд-во Казанского НЦ РАН, 1995. 58 с.
- [9] Яновский Л.С., ред. *Инженерные основы авиационной химмотологии*. Казань, Изд-во Казан. ун-та, 2005. 714 с.
- [10] Яновский Л.С., ред. *Горюче-смазочные материалы для авиационных двигателей*. Казань, Мастер Лайн, 2002. 400 с.
- [11] Алиев И.Н., Мильвидский А.Р. Деформация поверхности электропроводящей жидкости под действием импульса сильного поля. *Инженерно-физический журнал*, 2004, т. 77, № 1, с. 133–134.
- [12] Алтунин В.А., ЩигOLEV А.А., Юсупов А.А. Повышение надежности систем смазки поршневых двигателей внутреннего сгорания. *Проблемы и перспективы развития двигателестроения. Матер. докл. Международ. научно-практ. конф.* Самара, 25–27 июня 2014. Изд-во СГАУ им. акад. С.П. Королева, 2014, ч. 1, с. 157.
- [13] Алтунин В.А., Алтунин К.В., Адиятуллин И.Р., Ермолаев А.В., Маханько Д.В., ЩигOLEV А.А., Обухова Л.А., Платонов Е.Н., Демиденко В.П., Монда В.А., Алиев И.Н., Яновская М.Л. Исследование и применение электростатических полей в различных средах в земных и космических условиях. *Проблемы теплообмена и гидродинамики в энергомашиностроении. Тр. VIII Школы-семинара молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова. Сек. № 1. Гидродинамика и теплообмен в одно- и двухфазных потоках*. Казань, Изд-во КГЭУ, 2012, с. 193–201.
- [14] Пинчук Е.А., Маркова Л.В. Магнитные методы и устройства оперативной диагностики трибосопряжений (обзор). *Трение и износ*, 2000, т. 21, № 2, с. 197–204.
- [15] Нигматуллин Р.Г., Нигматуллин В.Р., Нигматуллин И.Р. *Диагностика двигателя внутреннего сгорания по анализу моторного масла*. Уфа, Изд-во ГУПРБ «Уфимский полиграфкомбинат», 2011. 297 с.

References

- [1] *Dvigateli vnutrennego sgoraniia: ustroistvo i rabota porshnevykh i kombinirovannykh dvigatelei* [Internal combustion engines: structure and operation of reciprocating engines and combined]. Ed. Orlin A.S., Kruglov M.G. Moscow, Mashinostroenie publ., 1990. 228 p.
- [2] Agafonov A.N., Saidanov V.O., Gudz' V.N. *Kombinirovannye energoustanovki ob"ektov maloi energetiki* [Combined power plants of small power]. Saint Petersburg, SPbGPU publ., 2005. 262 p.

- [3] Kuz'min N.A., Zelentsov V.V., Krupa V.V. Teplovoesostoianie, iznashivanie i otlozheniia v DVS [Thermal state, wear and deposits in the engine]. *Izvestiia Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta* [Proceedings of the TSU]. 2001, is. 5, pp. 58–61.
- [4] Zrel'ov V.A. *Otechestvennye gazoturbinnye dvigateli. Osnovnye parametry i konstruktivnyye skhemy* [Domestic gas turbine engines. Main parameters and constructive scheme]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2005. 336 p.
- [5] Gritsenko E.A., Danil'chenko V.P., Lukachev S.V., Reznik V.E., Tsybizov Iu.N. *Konvertirovanie aviatsionnykh GTD v gazoturbinnye ustanovki nazemnogo primeneniia* [Converting the aviation gas turbine engine in the gas turbine unit for terrestrial applications]. Samara, SNTs RAN publ., 2004. 266 p.
- [6] Boev A.A., Petrukhin A.G., Shklovets A.O. O perspektivnom podvode masla k podshipnikovomu uzlu GTD [About promising method supply oil to bearing of gas turbine engine]. *Izvestiia Samarskogo nauchnogo tsentra rossiiskoi akademii nauk. Mekhanika i mashinostroenie* [Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. 2013, vol. 15, no. 6(4), pp. 1022–1026.
- [7] Eliseev Iu.S., Manushin E.A., Mikhail'tsev V.E., Surovtsev I.G., Osipov M.I. *Teoriia i proektirovanie gazoturbinnnykh i kombinirovannykh ustanovok* [Theory and design of gas turbine and combined plants]. Moscow, Bauman Press, 2000. 640 p.
- [8] Shigabiev T.N., Ianovskii L.S., Galimov F.M., Ivanov V.F. *Teplo- i massoobmen pri fazovykh prevrashcheniiakh topliv i masel* [Heat and mass transfer at phase transformations of fuels and oils]. Kazan, KazanSC of RAS publ., 1995. 58 p.
- [9] *Inzhenernye osnovy aviatsionnoi khimnotologii* [Engineering bases aviation Chemmotology]. Ed. Ianovskii L.S. Kazan, KFU publ., 2005. 714 p.
- [10] *Goriuche-smazochnye materialy dlia aviatsionnykh dvigatelei* [Fuels and lubricants for aircraft engines]. Ed. Ianovskii L.S. Kazan, Master Lain publ., 2002. 400 p.
- [11] Aliev I.N., Mil'vidskii A.R. Deformation of the surface of a conducting liquid under the action of a pulse of a strong field. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2004, vol. 77, no. 1, pp. 161–162.
- [12] Altunin V.A., Shchigolev A.A., Iusupov A.A. Povyshenie nadezhnosti system smazki porshnevnykh dvigatelei vnutrennego sgoraniia [Improving the reliability of the lubrication of the piston engine]. *Problemy i perspektivy razvitiia dvigatelestroeniia. Materialy dokladov Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Proceedings of the International scientific and practical conference «Problems and prospects of the engine»]. Samara, 25–27 June 2014. SGAU im. akad. S.P. Koroleva publ., 2014, pt. 1, p. 157.
- [13] Altunin V.A., Altunin K.V., Adiatullin I.R., Ermolaev A.V., Makhank'o D.V., Shchigolev A.A., Obukhova L.A., Platonov E.N., Demidenko V.P., Monda V.A., Aliev I.N., Ianovskaia M.L. Issledovanie i primeneniye elektrostatcheskikh polei v razlichnykh sredakh v zemnykh i kosmicheskikh usloviakh [Research and application of electrostatic fields in various environments in the terrestrial and space environments]. *Problemy teplomassoobmena i gidrodinamiki v energomashinostroenii. Tr. 8 Shkoly-seminara molodykh uchennykh i spetsialistov akademika RAN V.E. Alemasova. Sek. № 1. Gidrodinamika i teplomassoobmen v odno- i dvukhfaznykh potokakh* [Works 8 School-seminar of young scientists and specialists of academician V.E. Alemasov «Problems of heat-mass exchange and hydrodynamics in power machinery». Section 1 fluid flow and heat and mass transfer in single and two-phase flows]. Kazan, KSEU publ., 2012, pp. 193–201.
- [14] Pinchuk E.A., Markova L.V. Magnitnye metody iustroistva operativnoi diagnostiki tribosopriazhenii (obzor) [Magnetic methods and devices of rapid diagnosis units (overview)]. *Treniei i znos* [Journal of Friction and Wear]. 2000, vol. 21, no. 2, pp. 197–204.
- [15] Nigmatullin R.G., Nigmatullin V.R., Nigmatullin I.R. *Diagnostika dvigatelei vnutrennego sgoraniia po analizu motornogo masla* [Diagnosis of the internal combustion engine by analysis of engine oil]. Ufa, Ufimskii poligrafombinat publ., 2011. 297 p.

Информация об авторах

АЛТУНИН Виталий Алексеевич (Казань) — доктор технических наук, профессор кафедры «Теплотехника и энергетическое машиностроение». КНИТУ им. А.Н. Туполева — КАИ (420111, Казань, Российская Федерация, К. Маркса ул., д. 10, e-mail: altspacevi@yahoo.com).

АЛТУНИН Константин Витальевич (Казань) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплотехника и энергетическое машиностроение». КНИТУ им. А.Н. Туполева — КАИ (420111, Казань, Российская Федерация, К. Маркса ул., д. 10).

АЛИЕВ Исмаил Новрузович (Москва) — доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Техническая физика». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

ШИГОЛЕВ Александр Александрович (Казань) — соискатель ученой степени кандидата технических наук кафедры «Теплотехника и энергетическое машиностроение». КНИТУ им. А.Н. Туполева — КАИ (420111, Казань, Российская Федерация, К. Маркса ул., д. 10).

ЮСУПОВ Артур Альбертович (Казань) — аспирант кафедры «Теплотехника и энергетическое машиностроение». КНИТУ им. А.Н. Туполева — КАИ (420111, Казань, Российская Федерация, К. Маркса ул., д. 10).

Information about the authors

ALTUNIN Vitaliy Alekseevich (Kazan) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Heat and Power Engineering. Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI (420111, Kazan, Russian Federation, K. Marx St., Bldg.10, e-mail: altspacevi@yahoo.com).

ALTUNIN Konstantin Vitalievich (Kazan) — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Heat and Power Engineering. Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI (420111, Kazan, Russian Federation, K. Marx St., Bldg. 10).

ALIEV Ismail Novruzovich (Moscow) — Doctor of Science (Physics and Math), Professor, Department of Technical Physics. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1).

SHCHIGOLEV Aleksandr Aleksandrovich (Kazan) — Candidate of Science, Eng. (Pending Dissertation), Department of Heat and Power Engineering. Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI (420111, Kazan, Russian Federation, K. Marx St., Bldg.10).

YUSUPOV Artur Albertovich — Postgraduate, Department of Heat and Power Engineering. Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI (420111, Kazan, Russian Federation, K. Marx St., Bldg. 10).



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана вышло в свет учебное пособие **А.С. Иванова, С.В. Муркина** «Начала машиностроения»

Машиностроение представлено как комплексная деятельность, связанная с расчетами, конструированием, изготовлением и реализацией машин. Изложение специальных сложных вопросов чередуется с историческими примерами и примерами, взятыми из современной жизни, что способствует овладению базовыми знаниями по механике, сопротивлению материалов, взаимозаменяемости, надежности машин, основам конструирования машин, расширяя при этом знания по истории техники, развития машиностроения и массового производства.

Для студентов МГТУ им. Н.Э. Баумана, обучающихся по программе «Введение в машиностроение». Может быть полезно студентам других вузов, ученикам школ, аспирантам, преподавателям, а также специалистам в области машиностроения.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru