

## Результаты экспериментального исследования влияния электростатических полей на процесс осадкообразования в моторном авиационном масле марки МС-20 в условиях его вынужденной конвекции в кольцевом канале

© В.А. Алтунин<sup>1</sup>, М.В. Львов<sup>1</sup>, К.В. Алтунин<sup>1</sup>, А.А. Юсупов<sup>1</sup>,  
А.А. Щиголев<sup>1</sup>, М.Л. Яновская<sup>2</sup>

<sup>1</sup>КНИТУ им. А.Н. Туполева — КАИ, Казань, 420111, Российская Федерация

<sup>2</sup>ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова», Москва, 111116, Российская Федерация

*Предотвращение и уменьшение углеродистых осадков в двигателях и энергетических установках летательных аппаратов — одна из актуальных задач. На примере моторного авиационного масла марки МС-20 экспериментально исследовано влияние электростатических полей на процесс осадкообразования в условиях его вынужденной конвекции в узком кольцевом канале. При этом использована система рабочих электродов типа «игла–игла», расположенных перпендикулярно потоку масла. В результате обнаружено, что твердый углеродистый осадок не образуется в зоне прохождения силовых линий электростатического поля. Раскрыты сложные термодинамические условия, в которых находятся моторные авиационные масла в системах смазки двигателей и энергоустановок летательных аппаратов. Проанализировано негативное влияние осадкообразования на работу систем смазки двигателей и энергоустановок летательных аппаратов. Показаны возможности электростатических полей при их использовании для борьбы с осадкообразованием в моторных авиационных маслах в условиях их вынужденной конвекции в узком кольцевом канале: при их одновременном включении с экспериментальной установкой; при их позднем включении; при их импульсном включении без смены и со сменой полярностей на рабочих соосных иглах.*

*Проведена полная классификация существующих и перспективных (новых) способов и методов борьбы с осадкообразованием в системах смазки двигателей и энергоустановок летательных аппаратов. Создана экспериментальная база данных о возможностях электростатических полей по предотвращению, ограничению и замедлению роста твердых углеродистых отложений на нагреваемых деталях в условиях вынужденной конвекции моторных авиационных масел в системах смазки отечественных двигателей и энергоустановок летательных аппаратов. Применение материалов данной статьи будет способствовать расширению и углублению знаний об осадкообразовании и способах борьбы с ним в новых и перспективных системах смазки отечественных двигателей и энергоустановок летательных аппаратов повышенных характеристик.*

**Ключевые слова:** системы смазки двигателей и энергоустановок летательных аппаратов, моторное авиационное масло, вынужденная конвекция, тепловые процессы, узкий кольцевой канал, нагреваемая металлическая трубка, температура, давление, скорость прокачки, осадкообразование, электростатические поля, соосные рабочие иглы

**Введение.** Осадкообразование в моторных авиационных маслах (МАО) — одна из ключевых проблем, влияющих на снижение эффективности и надежности работы двигателей и энергетических

установок (ЭУ) летательных аппаратов (ЛА) [1–7]. Твердые углеродистые отложения, образующиеся на нагретых поверхностях, ухудшают теплообмен, увеличивают износ деталей и могут приводить к аварийным ситуациям. Традиционные методы борьбы с осадкообразованием, такие как использование присадок или механическая очистка, обладают ограниченной эффективностью, особенно при высоких температурах. В связи с этим актуальным направлением исследований является разработка новых способов, основанных на физических методах воздействия, по предотвращению и уменьшению углеродистых осадков.

Одним из перспективных способов борьбы с осадкообразованием в МАМ является применение электростатических полей  $E$ , способных влиять на заряженные частицы и диполи в МАМ, предотвращая их осаждение на нагреваемых металлических поверхностях [8–37]. Ранние исследования этих полей при естественной конвекции МАМ показали [16–18], что электростатические поля не только интенсифицируют теплоотдачу к МАМ в условиях их естественной конвекции, но и предотвращают негативный процесс осадкообразования на нагреваемых деталях в объеме МАМ. Дальнейшие экспериментальные исследования были связаны с влиянием электростатических полей  $E$  на тепловые процессы в МАМ при их вынужденной конвекции, по результатам влияния этих полей только на теплоотдачу к МАМ были опубликованы статьи [19–37].

Данная статья — очередная в цикле публикуемых в этом журнале статей об исследовании тепловых процессов в МАМ марки МС-20 без влияния и с влиянием электростатических полей  $E$ , она посвящена влиянию полей  $E$  на осадкообразование в условиях вынужденной конвекции МАМ.

Поскольку процессы борьбы с осадкообразованием в МАМ в условиях их вынужденной конвекции, характерной для реальных эксплуатационных режимов в двигателях и ЭУ ЛА, изучены и исследованы еще недостаточно, тема данной статьи является весьма актуальной, а приведенный в ней материал публикуется впервые.

Цель данной статьи — представить результаты экспериментального исследования влияния поперечных электростатических полей  $E$  на процесс осадкообразования в МАМ марки МС-20 при его вынужденном движении в узком кольцевом канале с внутренней нагреваемой металлической трубкой.

Полученные результаты позволили авторам расширить понимание механизмов воздействия электростатических полей  $E$  на осадкообразование в условиях вынужденной конвекции МАМ, создать экспериментальную базу данных об их возможностях по предотвращению, ограничению и замедлению роста твердых углеродистых отложений на нагреваемых деталях в условиях вынужденной конвекции моторных

авиационных масел в системах смазки отечественных двигателей и энергоустановок ЛА, разработать и предложить формулы, методики и рекомендации для создания новых систем смазки двигателей и ЭУ ЛА с повышенным ресурсом, надежностью и эффективностью.

**Анализ влияния осадкообразования на работу систем смазки двигателей и энергоустановок ЛА.** При работе авиационных поршневых двигателей внутреннего сгорания (АПДВС), воздушно-реактивных и газотурбинных двигателей (ВРД и ГТД), а также ЭУ ЛА происходит нагрев не только самих двигателей и ЭУ, но и их систем смазки. МАМ в системах смазки двигателей и ЭУ ЛА находятся в очень сложных термодинамических условиях по давлению и температуре при естественной и вынужденной конвекции [2, 16–37]. Например, в АПДВС температура в зоне поршневых колец, внутренней части поршней, клапанов и других деталей, возникающая от газообразных продуктов сгорания, может достигать более 2527 °С (2800К). Температура подшипника может доходить до 150 °С (423К) в зависимости от расхода масла. Температура деталей и узлов масляных систем ДВС составляет от 80 °С (353К) до 300 °С (573К), давление может превышать 10...15 МПа. Почти 50 % теплоты моторное масло получает от соприкосновения с горячими деталями двигателя (поршнем, кольцом, гильзами, каналами), остальные 50 % — в результате трения в подшипниках двигателя и трения поршней в цилиндрах [2, 16–18, 22].

Масло подводится к узлам трения у ВРД, ГТД и ЭУ ЛА не только для смазывания поверхностей трения, но и для отвода теплоты от этих узлов [1–7, 16–37]. Температура масла на входе колеблется от 20 °С (293К) до 50 °С (323К), а на выходе зависит от теплонапряженности двигателя. В двигателях самолетов, летающих с дозвуковыми скоростями, она находится на уровне примерно 125 °С (398К), а в двигателях сверхзвуковых самолетов достигает 200 °С (473К) и более. Температура масла на выходе из современных теплонапряженных ГТД гражданской авиации достигает 165 °С (438К), а военной авиации — от 200 °С (473К) до 225 °С (498К). Давление в системах смазки таких двигателей может колебаться от 0,5 до 2,0 МПа и более.

Среди всех возникающих в МАМ тепловых процессов и проблем осадкообразование занимает одно из ведущих мест [2, 16–37]. Процесс осадкообразования в МАМ, в том числе и таких как МС-20, обусловлен сложными термоокислительными и физико-химическими процессами, происходящими при высоких температурах.

Негативный процесс осадкообразования происходит в масляных каналах, форсунках, фильтрах и теплообменных аппаратах двигателей и ЭУ ЛА в земных и космических условиях. Вследствие осадкообразования понижаются плановый (штатный) и расчетный ресурсы двигателей и ЭУ ЛА, происходит неожиданный внезапный выход из строя как масляной системы, так и двигателя и ЭУ в целом, а значит,

и всего ЛА. Поэтому борьба с осадкообразованием в системах смазки двигателей и ЭУ ЛА является актуальной проблемой, которую необходимо решать. Так, частичное и полное закоксовывание маслоподводящих и маслоотводящих каналов, расположенных внутри и снаружи АПДВС, приводит, соответственно:

- к частичной и недостаточной смазке и охлаждению трущихся деталей, к быстрому выходу из строя всего двигателя;
- полному прекращению смазки и охлаждения трущихся деталей, к ускоренному выходу из строя всего двигателя.

Масляные форсунки АПДВС, расположенные под поршнями и предназначенные для смазки и охлаждения поршней, полностью закоксовываются через 800 ч (циклов) работы двигателя, что несанкционированно приводит к ускоренному и неожиданному выходу его из строя, к различным аварийным ситуациям и летным происшествиям [2–7, 16–18].

Процесс осадкообразования в системах смазки различных базовых и вспомогательных ВРД, ГТД и ЭУ ЛА также очень опасен [2, 16–37]. Твердые углеродистые частицы осадка, находящиеся в МАМ, быстро забивают сеточные фильтры, каналы, ухудшают стабильную работу всего ВРД, ГТД, ЭУ ЛА. Частичное закоксовывание масляной форсунки приводит к недостаточной и нерасчетной частичной смазке и частичному охлаждению подшипников и трущихся деталей, к пригоранию шариков и роликов подшипника, к быстрому выходу из строя двигателя, ЭУ и всего ЛА. Полное закоксовывание масляной форсунки вызывает полное прекращение смазки и охлаждения подшипников и трущихся деталей, к пригоранию шариков и роликов подшипника, к ускоренному разрушению подшипников и всего двигателя.

Масляные форсунки ВРД, ГТД и ЭУ ЛА полностью закоксовываются через 800 ч (циклов) их работы, что также влияет на несанкционированное быстрое и неожиданное наступление масляного голодания, на значительное сокращение штатного ресурса двигателя и ЭУ с возникновением в дальнейшем аварийных ситуаций, вплоть до разрушения двигателя, ЭУ и всего ЛА.

Согласно теории Г.Ф. Большакова [15–18], все углеводородные жидкости до температуры 40 °С (313К) являются диэлектриками, при температуре 40 °С (313К) в них появляются заряженные (+, –) частицы и они становятся электропроводными средами, при дальнейшем повышении температуры до 100 °С (373К) в них появляются диполи, активно участвующие в процессе осадкообразования.

По Шоттки и Френкелю известно [15–18], что любые металлические поверхности (даже полированные) имеют микронеровности, на остриях которых всегда присутствуют заряды с чередующимися (+), (–) знаками. При нагреве углеводородных жидкостей до температур

более 100 °С (373К) диполи притягиваются к противоположным зарядам на микроостриях поверхности металлических деталей, образуя слой углеродистого осадка. Этот процесс в полной мере относится и к моторным маслам нефтяного происхождения, в том числе и к МАМ.

Электростатические поля  $E$  способны влиять на этот процесс путем управления движением заряженных частиц и диполей. Если приложить внешнее электростатическое поле  $E$ , возникает электрический ветер — направленное движение ионов, которое индуцирует конвективные потоки в масле. Это явление приводит к интенсификации теплоотдачи и предотвращению осаждения частиц на нагретых металлических поверхностях. В зоне силовых линий электростатических полей  $E$  диполи не могут притягиваться к остриям микронеровностей металлических поверхностей с противоположными знаками, что предотвращает негативный процесс осадкообразования.

Впервые эффекты предотвращения осадкообразования на нагреваемом металлическом рабочем участке в зоне прохождения силовых линий электростатических полей  $E$  в жидких и газообразных углеводородных горючих и охладителях при их естественной и вынужденной конвекции были обнаружены в ходе экспериментальных исследований В.А. Алтуниным [15], в МАМ при их естественной конвекции — В.А. Алтуниным и А.А. Щиголевым [16–18], в МАМ при их вынужденной конвекции — В.А. Алтуниным и М.В. Львовым [16–36].

Процесс осадкообразования и возникновение слоя твердых углеродистых отложений  $\delta_{oc}$  на нагреваемых деталях в масляных системах двигателей и ЭУ ЛА можно представить в виде функции, зависящей от следующих факторов [16–37]:

$$\delta_{oc} = f(T_{ст}, T_{ж}, p, W, M, П, K_{шер}, K_{O_2}, X, N, \Gamma, \tau, E),$$

где  $T_{ст}$  — температура стенки (канала со стороны масла);  $T_{ж}$  — температура жидкости (масла);  $p$  — давление в масляной системе;  $W$  — скорость прокачки масла;  $M$  — материал стенки;  $П$  — присадки;  $K_{шер}$  — степень шероховатости поверхности;  $K_{O_2}$  — насыщенность кислородом;  $X$  — вид авиационного моторного масла, его физико-химические и физико-технические характеристики и свойства;  $N$  — число часов (циклов) двигателя или ЭУ;  $\Gamma$  — геометрические характеристики внутренних узлов и деталей масляных систем, расстояний между ними;  $\tau$  — время контакта МАМ с нагреваемым рабочим участком (с металлической деталью);  $E$  — электростатические поля.

Несмотря на то что процесс осадкообразования в МАМ зависит от многих факторов, все-таки одним из главных факторов является температура жидкости ( $T_{ж}$ ), т. е. температура МАМ, или температура металлической нагреваемой стенки ( $T_{ст}$ ). Необходимо отметить, что

осадок может образовываться при любом давлении, в условиях естественной и вынужденной конвекции МАМ, в земных и космических условиях: в объеме МАМ при его нагреве до температур более 100 °С (373К); на поверхностях металлической детали, которые омываются нагретым МАМ при его вынужденной конвекции или находятся в объеме нагретого МАМ при его естественной конвекции; на поверхности нагреваемой до температур более 100 °С (373К) детали в объеме холодного (ненагретого) МАМ; на поверхности нагреваемой детали в объеме нагретого МАМ.

Практически неизвестно влияние электростатических полей  $E$  на  $\delta_{oc}$  в условиях вынужденной конвекции МАМ. Поэтому необходимо проведение экспериментальных исследовательских работ с применением электростатических полей  $E$  в МАМ в условиях их вынужденной конвекции. Следует отметить, что некоторые ученые, конструкторы и разработчики новой техники в своей работе весьма слабо учитывают негативный процесс осадкообразования в МАМ или даже не учитывают его вообще. С негативным процессом осадкообразования следует начинать борьбу уже на ранней стадии проектирования и создания систем смазки АПДВС, ВРД, ГТД и ЭУ ЛА, а не вести эту запоздалую, но необходимую борьбу в ходе эксплуатации техники, что вызывает большие экономические и технические потери и трудности, а также нарушение безопасности полетов, приводящие к возникновению аварийных ситуаций, авариям и гибели людей.

**Существующие и перспективные способы и методы борьбы с осадкообразованием в МАМ.** На основе проведенных обзора научно-технической литературы и экспериментальных исследований была создана полная классификация существующих и перспективных (новых) методов и способов борьбы с осадкообразованием в МАМ и в системах смазки двигателей и ЭУ ЛА. Так, существующие методы и способы борьбы [2, 16–37] подразделены на три группы:

1) *предотвращающие осадок*

- применение специальных антиокислительных, антиосадкообразующих, моющих и других присадок (химико-технологический способ);
- правильный выбор МАМ (эксплуатационный способ);
- осуществление контроля за масляными фильтрами (эксплуатационный способ);

2) *уменьшающие осадок*

- своевременная смена фильтрующих элементов (эксплуатационный способ);
- выбор металла (для изготовления деталей, контактирующих с МАМ) с наименьшей скоростью осадкообразования на поверхностях (конструкторско-эксплуатационный способ);
- удаление кислорода воздуха из масляной системы (конструкторско-эксплуатационный способ);

- плановая замена отработанного МАМ на новое (эксплуатационный способ);
- осуществление контроля над масляными фильтрами (эксплуатационный способ);
- 3) *удаляющие осадок*
  - промывка систем смазки специальными моющими жидкостями (без разборки и с разборкой двигателя, ЭУ ЛА) (физико-химический метод);
  - механическая очистка деталей и каналов масляной системы от осадка (с разборкой двигателя, ЭУ ЛА) состоит: из очистки ручными инструментами (скребками, щетками и др.); пескоструйной очистки (сухой или влажной); пневматической очистки косточковой крошкой; очистки с помощью дисковых проволочных щеток; очистки деталей в барабанах (галтовки); промывки моющими средствами с ультразвуковым или термоакустическим воздействием (физико-механический метод);
  - промывка каналов масляной системы с помощью специальных жидкостей на установке с термоакустическими автоколебаниями (ТААК) давления (с разборкой двигателя, ЭУ ЛА) (физико-механический метод);
  - выжигание твердого углеродистого осадка в богатом пламени метана (с разборкой двигателя, ЭУ ЛА) (химико-термический метод);
  - своевременная смена фильтрующих элементов (эксплуатационный способ);
  - замена закоксованных деталей и агрегатов масляной системы на новые (с разборкой двигателя, ЭУ ЛА) (эксплуатационный способ);
  - плановая замена отработанного МАМ на новое (эксплуатационный способ);
  - осуществление контроля над масляными фильтрами (эксплуатационный способ);
  - очистка МАМ с помощью магнитных полей  $H$  и электростатических полей  $E$  с разборкой двигателя, ЭУ ЛА (физико-технический метод).

Однако применять различные антиосадкообразующие присадки можно только при температуре масла или нагреваемых стенок каналов до 200 °С (473К). При дальнейшем повышении температуры осадок начинает появляться и увеличиваться. Остальные методы и способы являются малоэффективными и очень затратными по временным, техническим, технологическим и экономическим показателям, связанным также со снятием двигателей и ЭУ ЛА, с их отправкой на ремонтный завод и вынужденным простоем ЛА.

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 невозможно очистить таким способом. Использование механической очистки с помощью разных устройств и инструментов также не позволяет полностью решить данную задачу. Кроме того, некоторые детали деформируются с образованием микротрещин, а мелкие закоксованные детали (например, масляные форсунки) чаще всего заменяют новыми. Выжигание твердого осадка в богатом пламени метана не только способствует очистке, например, съемных масляных каналов, но и приводит к их короблению, ухудшению прочности, разрушению в местах пайки, образованию микротрещин. Остается проблема полной очистки внутренних (несъемных) каналов и деталей масляных систем двигателей и ЭУ ЛА. Существующая система контроля способна следить за температурой и давлением в системах смазки (преимущественно в фильтрах), но не может контролировать появление углеродистого осадка и его рост 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.

Перспективные и новые методы и способы борьбы с осадкообразованием в МАМ для ПАДВС, ВРД, ГТД, ЭУ ЛА, разработанные авторами статьи на основе экспериментальных исследований с МАМ [16–37], также подразделены на три группы:

*1) предотвращающие осадок*

– разработка новых МАМ с высокими свойствами по границе высокотемпературного разложения (химико-технологический метод);

– улучшение технологии получения масла с применением гидрокрекинга (химико-технологический метод);

– улучшение технологии очистки масел (обработка высококонцентрированной серной кислотой или сернистым ангидридом; экстракция с помощью водных растворов серной кислоты; перколяция через активированные адсорбенты; гидроочистка) (химико-технологический метод);

– создание новых антиосадкообразующих присадок, способных защитить МАМ от осадка при температуре нагрева более 300 °С (573К) (химико-технологический метод);

– разработка новых устройств (например, рубашек охлаждения) по охлаждению нагреваемых деталей масляных систем до температуры 100 °С (373К) и ниже (конструктивный метод);

– применение электростатических полей  $E$  (физико-технический конструктивный метод);

*2) уменьшающие и ограничивающие осадок*

– использование контактирующих с МАМ металлических полированных поверхностей (конструктивно-технологический метод);

– применение контактирующих с МАМ металлических поверхностей, выполненных в виде конусной (кольцевой или винтовой) резьбы

с высотой зубьев 2...5 мм (рост осадка ограничен на высоте зубьев) (конструктивно-технологический метод);

– создание электроизолирующего слоя на поверхностях металлических деталей, контактирующих с МАМ (конструктивно-технологический метод);

– использование электростатических полей  $E$  (физико-технический конструктивный метод);

3) *удаляющие осадок, основанные на конструктивных изменениях масляных каналов, форсунок, фильтров* (конструктивные методы):

– создание резервных каналов, форсунок и фильтров (без применения электростатических полей  $E$ , с их применением, гибридно);

– использование (для каналов и форсунок) внутренних соосных игл для контроля над образованием и удалением осадка, для электро-распыла МАМ с применением электростатических полей  $E$  в случае поломки основной насосной системы (гибридный метод, так как включает сразу три процесса борьбы с осадкообразованием);

– применение 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 (конструкторско-эксплуатационный способ);

– применение гофрированных металлических масляных каналов, сжимаемых и разжимаемых (для удаления осадка) с помощью специального устройства в ручном, полуавтоматическом и автоматическом режимах (конструкторско-эксплуатационный способ).

Кроме того, перспективными также можно считать новые датчики, системы, способы и методы контроля за осадкообразованием (без применения электростатических полей  $E$ , с их применением, гибридно), которые позволят:

– вести оперативный контроль за степенью закоксованности масляных (подводящих, отводящих) каналов, фильтров, форсунок как в период работы, так и в период молчания двигателей и ЭУ ЛА в реальном времени (на наземной стоянке, на космической орбите);

– вести оперативный контроль за результатами автоматической очистки масляных (подводящих, отводящих) каналов, фильтров, форсунок от слоя твердых углеродистых отложений в период как работы, так и молчания двигателей и ЭУ ЛА в реальном времени (на наземной стоянке, на космической орбите);

– в автоматическом и ручном режимах в период работы и молчания двигателя и ЭУ ЛА принимать решение о включении в работу средств автоматической очистки масляного канала, форсунки, фильтра; резервного масляного канала, форсунки, фильтра;

– выводить всю информацию о работе системы смазки и ее защиты от осадкообразования в двигателе и ЭУ ЛА в бортовой компьютер и на информационное табло летчика-космонавта, а также — в наземный компьютер и на наземное информационное табло наземного оператора.

Несмотря на такое разнообразие методов и способов борьбы с осадкообразованием в МАМ, большинство из них либо недостаточно эффективны при высоких температурах, либо требуется останов двигателя или ЭУ ЛА для обслуживания и ремонта. В связи с этим перспективным и новым направлением является разработка и применение физических методов воздействия на осадкообразование в МАМ, в частности, использование электростатических полей  $E$ .

Экспериментальные исследования с различными МАМ, включая МС-20, в условиях их естественной конвекции, подтвердили значительное влияние электростатических полей  $E$  как на интенсификацию теплоотдачи, так и на предотвращение, уменьшение и ограничение роста осадка [16–18]. Результаты экспериментального исследования влияния этих полей на теплоотдачу к МАМ в условиях их вынужденной конвекции были приведены в [19–36].

**Результаты экспериментального исследования влияния электростатических полей  $E$  на осадкообразование в моторных авиационных маслах при их вынужденной конвекции.** Эксперименты по исследованию влияния этих полей на осадкообразование в условиях вынужденной конвекции МАМ проводились на установках и рабочих участках, которые были подробно описаны и представлены в [19, 23–25]. В этих работах нагреваемая рабочая металлическая трубка, размещенная в узком кольцевом канале, снаружи охлаждалась МАМ марки МС-20, т. е. МАМ прокачивалось через узкий кольцевой канал при разных давлении и скорости, при этом рабочие соосные иглы с электростатическими полями  $E$  располагались перпендикулярно масляному потоку по центру трубки. Расстояния между рабочими соосными иглами фиксированно устанавливались перед каждым экспериментом и составляли 6 мм, 8 мм, 10 мм. На отдающую иглу подавалось электростатическое напряжение  $U = 0 \dots 30$  кВ, принимающая игла была заземлена.

В ходе экспериментальных исследований было установлено и зафиксировано следующее:

1) при включении в работу электростатических полей  $E$  одновременно с началом нагрева рабочей металлической трубки она не покрывалась осадком только в зоне прохождения силовых линий этих полей (на основе этого обнаруженного процесса авторами был создан новый и перспективный способ предотвращения осадкообразования на нагреваемой детали при вынужденной конвекции МАМ);

2) диаметр рабочих соосных игл ( $d = 1 \dots 3 \times 10^{-3}$  м) и углы их заточки  $\gamma$  в диапазоне  $15 \dots 85^\circ$  не влияют на распространение и конфигурацию силовых линий электростатических полей  $E$ , а значит и на значения максимального расстояния между внешними силовыми линиями этих полей. Если в этом месте провести сечение, то в проекции

будет круг диаметром  $D$ , который будет равен максимальному расстоянию между внешними силовыми линиями электростатических полей  $E$ , т. е.  $d$  и  $\gamma$  не влияют на изменение площади поверхности рабочей трубки, предотвращенной от осадкообразования;

3) в МАМ скорость прокачки  $W = 6,0$  м/с является граничной, т. е. при таком ее значении электрический ветер уже не способен оказывать влияния на тепловые процессы, происходящие в них, в том числе и на осадкообразование, так как все заряженные частицы рабочего тела уносятся потоком;

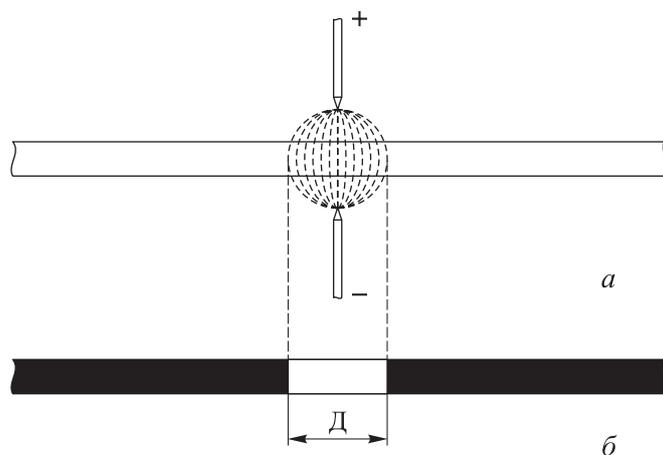
4) в МАМ при их вынужденной конвекции и разном давлении существуют зоны насыщения электростатическими полями  $E$  (см. далее рис. 6), в которых дальнейшее повышение подаваемого электростатического напряжения  $U$  не приводит к дальнейшему увеличению как коэффициента теплоотдачи, так и площади предотвращения осадкообразования из-за релаксации электрического ветра, а коэффициент теплоотдачи и величина площади рабочей трубки без осадка (или величина  $D$ ) принимают в этой зоне постоянные значения, которые были зафиксированы на границе начала этой зоны;

5) давление не оказывает воздействия на конфигурацию распространения силовых линий электростатических полей  $E$ , в том числе и в зоне их насыщения;

6) импульсное, т. е. периодическое, включение электростатических полей  $E$  даже с малым интервалом задержки между включениями (0,5 с), без смены полярности на рабочих соосных иглах и с их сменой уже приводит к появлению углеродистого осадка на всей нагреваемой рабочей металлической трубке, включая локальные зоны прохождения силовых линий электростатических полей  $E$ . Поэтому для надежного предотвращения осадкообразования на нагреваемой рабочей трубке в зоне прохождения силовых линий электростатических полей  $E$  необходимо включать их в работу в постоянном режиме без каких-либо отключений.

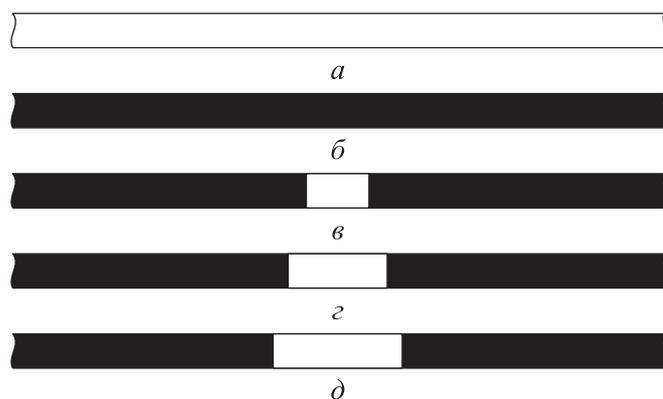
Осадкообразования не происходит в зоне прохождения силовых линий электростатических полей  $E$ , максимальное расстояние между внешними силовыми линиями этих полей при системе электродов типа «игла–игла» равно величине  $D$  (рис. 1).

Чистая рабочая трубка до эксперимента при расстоянии  $h = 6$  мм между соосными рабочими иглами и разных значениях высоковольтного электростатического напряжения  $U$  представлена на рис. 2, а, рабочая трубка после ее нагрева в среде вынужденного течения МАМ марки МС-20, полностью покрытая углеродистым осадком, — на рис. 2, б. Кроме того, схематично показана разница между размерами участков без осадка при разном подаваемом напряжении  $U$  (рис. 2, в, г, д). Подобные результаты также были получены при  $h = 8$  мм и  $h = 10$  мм.



**Рис. 1.** Влияние электростатических полей  $E$  на предотвращение твердого углеродистого осадка на нагреваемой рабочей металлической трубке при системе электродов типа «игла–игла» при вынужденной конвекции МАМ в узком кольцевом канале:

$a$  — конфигурация силовых линий электростатических полей  $E$  в МАМ;  $b$  — участок рабочей трубки размером  $D$  без осадка в зоне прохождения силовых линий этих полей, слева и справа от участка  $D$  образовался твердый углеродистый осадок

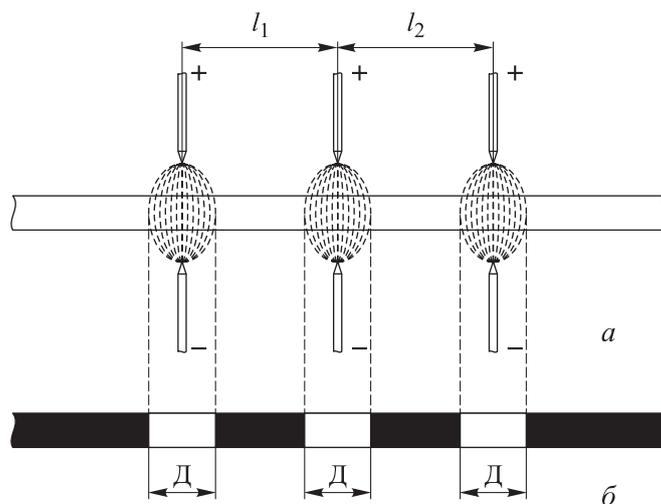


**Рис. 2.** Влияние электростатических полей  $E$  на предотвращение осадкообразования при  $h = 6$  мм:

$a$  — рабочая трубка без осадка до начала экспериментов;  $б$  — рабочая трубка со слоем осадка после эксперимента без влияния электростатических полей  $E$ ;  $в$  — рабочая трубка с участком без осадка  $D = 2,5$  мм при  $U = 5$  кВ;  $г$  — рабочая трубка с участком без осадка  $D = 5$  мм при  $U = 10$  кВ;  $д$  — рабочая трубка с участком без осадка  $D = 7,5$  мм при  $U = 15$  кВ

Для того чтобы исследовать возможность дальнейшего увеличения площади рабочей нагреваемой металлической трубки, предотвращенной от осадкообразования в МАМ, был создан рабочий участок с тремя парами рабочих соосных игл [25]. Конфигурации силовых линий электростатических полей  $E$  при использовании трех электродов системы типа «игла–игла», удаленных друг от друга на расстояния  $l_1$  и  $l_2$ , где  $l_1 = l_2 > D$ , при  $h = 6$  мм,  $U = 5$  кВ, показаны на рис. 3.

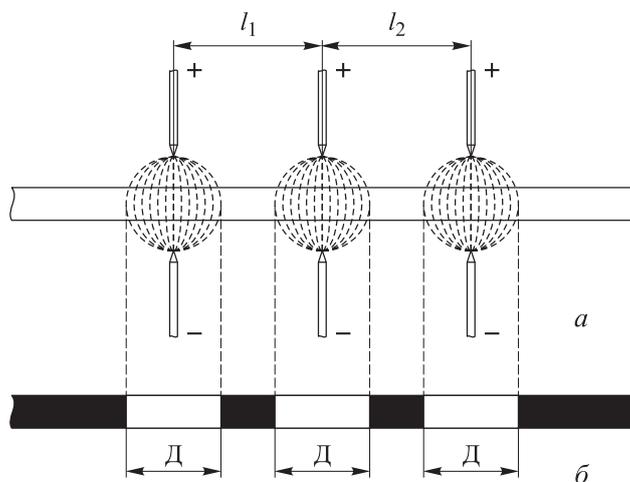
При показанном на рис. 3 расположении пар рабочих соосных игл и подаваемом высоковольтном электростатическом напряжении  $U = 5$  кВ удалось увеличить общую площадь рабочей трубки без осадка, по сравнению с рабочим участком с одной парой соосных игл (см. рис. 1, 2) только в сумме локальных мест прохождения силовых линий электростатических полей  $E$  от каждой пары соосных рабочих игл. Общего (сплошного) участка рабочей трубки без осадка получить не удалось.



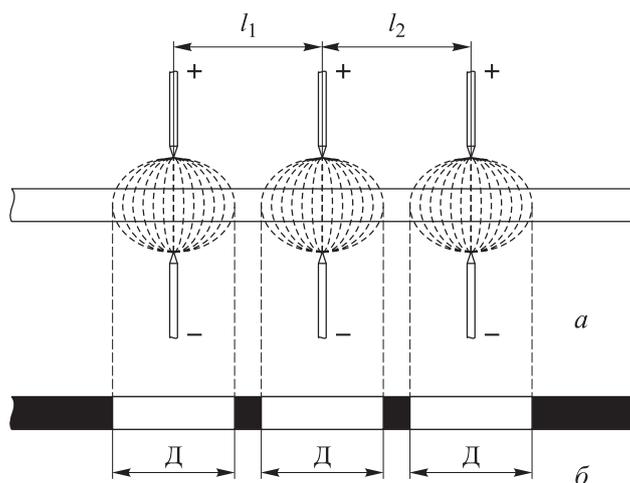
**Рис. 3.** Влияние электростатических полей  $E$  на предотвращение осадка при использовании трех пар электродов системы «игла–игла» при  $h = 6$  мм,  $U = 5$  кВ:  $a$  — конфигурация силовых линий электростатических полей  $E$  на рабочем участке с расстоянием между парами соосных рабочих игл, превышающим длину участка без осадка ( $l_1 = l_2 > D$ );  $b$  — участки рабочей трубки без осадка  $D$  в зонах прохождения силовых линий этих полей

Подаваемое высоковольтное электростатическое напряжение было повышено до  $U = 10$  кВ, что привело лишь к возрастанию величины  $D$  в локальных местах, а значит, к общему увеличению площади участка трубки без осадка, но только опять же в сумме локальных мест (рис. 4).

Когда в ходе эксперимента подаваемое высоковольтное электростатическое напряжение было повышено до  $U = 15$  кВ, это также привело к возрастанию величины  $D$  в локальных местах, а значит, к общему увеличению площади участка трубки без осадка, но только опять-таки благодаря сумме этих локальных мест (рис. 5). Общего (сплошного) участка рабочей трубки без осадка получить при этом также не удалось.



**Рис. 4.** Влияние электростатических полей  $E$  на предотвращение осадка при использовании трех пар электродов системы «игла–игла» при  $h = 6$  мм,  $U = 10$  кВ:  $a$  — конфигурация силовых линий электростатических полей  $E$  на рабочем участке с расстоянием между иглами, превышающим диаметр участка без осадка ( $l_1 = l_2 > D$ );  $б$  — участки рабочей трубки без осадка в зоне прохождения силовых линий этих полей



**Рис. 5.** Влияние электростатических полей  $E$  на предотвращение осадка при использовании трех пар электродов системы «игла–игла» при  $h = 6$  мм,  $U = 15$  кВ:  $a$  — конфигурация силовых линий этих полей на рабочем участке с расстоянием между иглами, превышающим диаметр участка без осадка ( $l_1 = l_2 > D$ );  $б$  — участки рабочей трубки без осадка в зоне прохождения силовых линий электростатических полей  $E$

При дальнейшем увеличении значений подаваемого напряжения  $U$  конфигурация силовых линий электростатических полей  $E$  изменяться уже не будет, так как далее наступает зона их насыщения (рис. 6), т. е. величина  $D$  тоже будет постоянной, равной своему предыдущему максимальному значению, которое было на границе начала этой зоны. Полученный в ходе различных исследований с жидкими УВГ и УВО,

а также с МАМ экспериментальный график (см. рис. 6) является необходимым для определения возможностей применения электростатических полей  $E$  при расчетах теплоотдачи и борьбы с осадкообразованием в проектируемых новых топливных и масляных системах двигателей и ЭУ ЛА. По этому графику можно довольно точно определить границу насыщения этих полей при любых расстояниях между остриями рабочих соосных игл. Именно с этого графика необходимо начинать все расчеты влияния электростатических полей  $E$  на тепловые процессы в МАМ, включая борьбу с осадкообразованием.

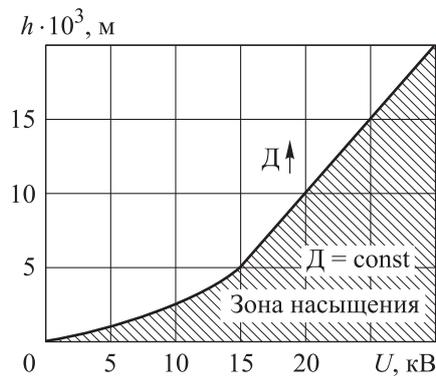


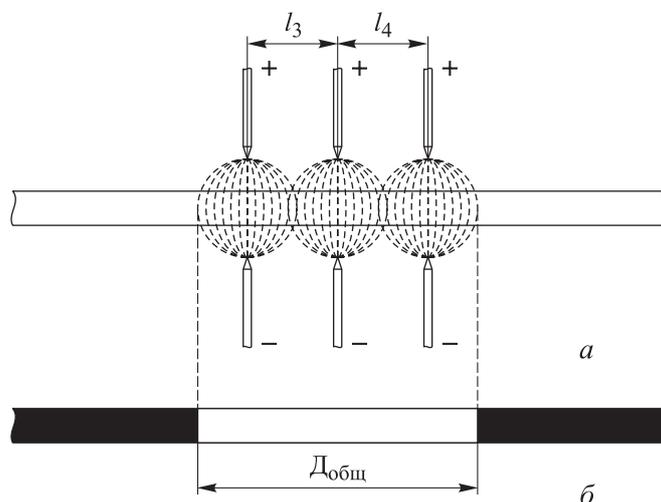
Рис. 6. Экспериментальная граница начала зоны насыщения электростатических полей  $E$  в жидких УВГ и УВО, в МАМ при системе электродов типа «игла–игла»

Следовательно, при таком расположении пар соосных рабочих игл, как  $l_1 = l_2 > D$  (см. рис. 5), невозможно достигнуть эффекта, при котором на рабочей трубке будет образовываться единый (сплошной) участок без осадка.

Обнаруженный процесс получения локальных зон без осадка на нагреваемой рабочей металлической трубке при вынужденной конвекции МАМ в узком кольцевом канале при влиянии поперечных электростатических полей  $E$  является очень важным, так как его можно использовать в современной и перспективной наземной, авиационной, аэрокосмической и космической технике в таких случаях, когда требуется повысить коэффициент теплоотдачи к МАМ и предотвратить осадкообразование на рабочих нагреваемых металлических участках или деталях именно в локальных местах оборудования. Результаты этого эксперимента также позволяют сделать следующий вывод: для того чтобы обеспечить получение общего (сплошного) одного большого участка рабочей трубки без осадка величиной  $D_{\text{общ}}$ , необходимо уменьшать расстояния между парами соосных рабочих игл до такой величины, чтобы выполнялось условие  $l_3 = l_4 < D$ .

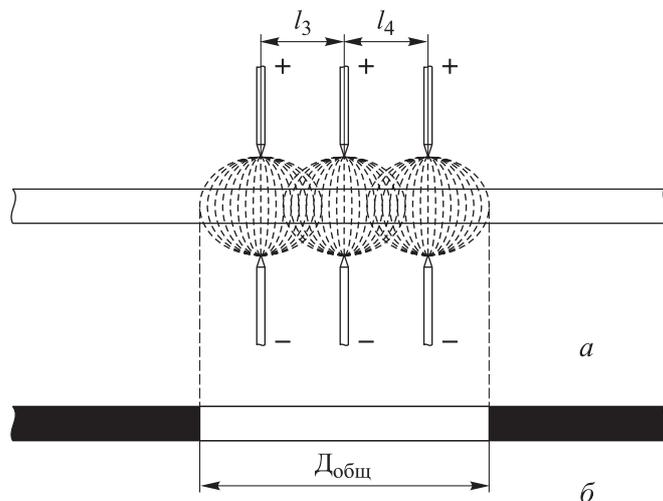
Случай, когда стало возможным организовать предотвращение осадкообразования на рабочей трубке и получить общий (сплошной)

и увеличенный участок без осадка, по сравнению с участком, когда была применена одна пара соосных рабочих игл (см. рис. 1, 2), показан на рис. 7.



**Рис. 7.** Влияние электростатических полей  $E$  на предотвращение осадка при использовании трех пар электродов системы «игла–игла» при  $h = 6$  мм,  $U = 10$  кВ:  $a$  — конфигурация силовых линий электростатических полей  $E$  на рабочем участке с меньшим расстоянием между парами соосных рабочих игл, чем величина  $D$  ( $l_3 = l_4 < D$ ), с точками пересечения внешних силовых линий таких полей на поверхности рабочей трубки;  $b$  — общий участок рабочей трубки без осадка  $D_{\text{общ}}$  в зоне прохождения силовых линий этих полей

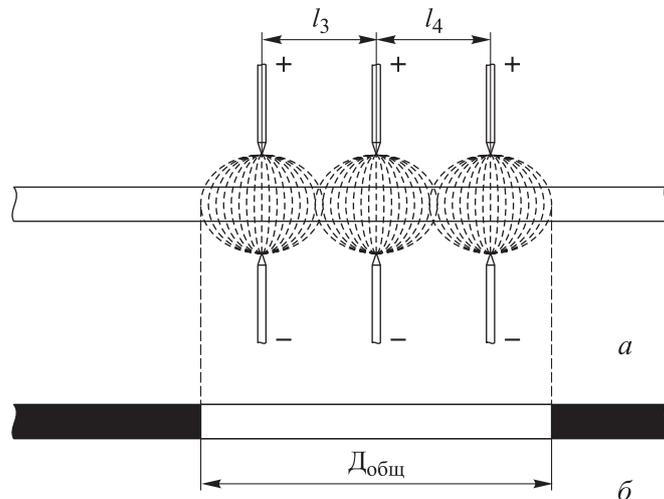
Для более качественной и оптимальной защиты рабочей трубки от осадкообразования в условиях вынужденной конвекции МАМ в узком кольцевом канале при использовании трех пар соосных рабочих игл с электростатическими полями  $E$ , размещенных перпендикулярно масляному потоку (см. рис. 7), необходимо так рассчитывать и проектировать расстояния между ними, чтобы внешние силовые линии этих полей от каждой пары соосных рабочих игл пересекались между собой в точках на поверхности самой трубки или в точках над поверхностью трубки, т.е. чтобы расстояние между этими точками пересечения силовых линий этих полей было равно или было чуть больше диаметра самой трубки. Кроме того, необходимо отметить, что в данном случае (см. рис. 7) рабочие параметры ( $h = 6$  мм,  $U = 10$  кВ) находятся в зоне возможной интенсификации теплоотдачи и борьбы с осадкообразованием, т.е. не на границе зоны насыщения электростатических полей  $E$  (см. рис. 6) и не в самой этой зоне, поэтому открывается возможность дальнейшего возрастания величины  $D_{\text{общ}}$  путем дальнейшего повышения подаваемого напряжения  $U$ , например, до  $U = 15$  кВ. При этом будут увеличены расстояния между внешними силовыми линиями электростатических полей  $E$  при каждой паре соосных рабочих игл, а самое главное, будет возрастать и величина  $D_{\text{общ}}$  (рис. 8).



**Рис. 8.** Влияние электростатических полей  $E$  на предотвращение осадка при использовании трех пар электродов системы «игла–игла» при  $h = 6$  мм,  $U = 15$  кВ: *a* — конфигурация силовых линий электростатических полей  $E$  на рабочем участке с меньшим расстоянием между парами соосных рабочих игл, чем величина  $D$  ( $l_3 = l_4 < D$ ), с точками пересечения внешних силовых линий этих полей над поверхностью рабочей трубки; *б* — общий участок рабочей трубки без осадка  $D_{общ}$  в зоне прохождения силовых линий электростатических полей  $E$

Дальнейшее повышение подаваемого напряжения  $U$  (см. рис. 8), например, до  $U = 20$  кВ, не приведет к ожидаемому увеличению значения величины  $D_{общ.}$ , которая останется постоянной вследствие попадания рабочих параметров в зону насыщения электростатических полей  $E$  (см. рис. 6). Однако в данном случае, есть еще одна возможность дальнейшего увеличения значения величины  $D_{общ.}$  (см. рис. 8). Поскольку на рис. 8 видно, что пересечение внешних силовых линий электростатических полей  $E$  происходит в точках, которые значительно удалены от поверхности рабочей нагреваемой трубки, то открывается еще одна возможность дальнейшего увеличения  $D_{общ.}$  — путем увеличения расстояний между парами соосных рабочих игл, чтобы совместить точки пересечения внешних силовых линий этих полей при соосных рабочих иглах (при рабочих параметрах  $h = 6$  мм,  $U = 15$  кВ) с поверхностью рабочей нагреваемой трубки (рис. 9).

Такой вариант расположения пар рабочих соосных игл и использования рабочих параметров, как  $h = 6$  мм,  $U = 15$  кВ (см. рис. 9), является наиболее оптимальным и максимально возможным для создания максимально возможного значения величины  $D_{общ.}$ . Если проанализировать различное расположение одной или нескольких пар соосных рабочих игл (см. рис. 1–5, 7–9) в рабочем участке, можно отметить, что для проектировщиков, конструкторов, разработчиков и создателей новой техники открывается возможность варьирования местоположением и количеством рабочих соосных игл, а также значениями рабочих

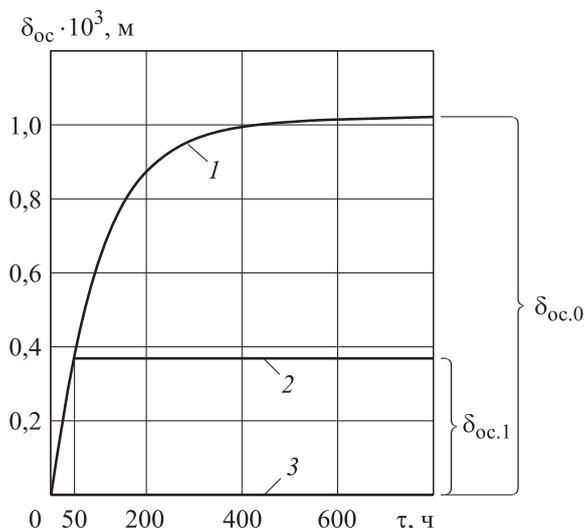


**Рис. 9.** Влияние электростатических полей  $E$  на предотвращение осадка при использовании трех пар электродов системы «игла–игла» при  $h = 6$  мм,  $U = 15$  кВ:  $a$  — конфигурация силовых линий электростатических полей  $E$  на рабочем участке с меньшим расстоянием между парами соосных рабочих игл, чем величина  $D$  ( $l_3 = l_4 < D$ ), с точками пересечения внешних силовых линий этих полей на поверхности рабочей трубки;  $b$  — общий участок рабочей трубки без осадка  $D_{\text{общ}}$  в зоне прохождения силовых линий электростатических полей  $E$

параметров  $h$ ,  $U$  для необходимой защиты нагреваемых деталей систем смазки от осадкообразования наряду с одновременной возможностью их дополнительного охлаждения в условиях вынужденной конвекции МАМ в двигателях и ЭУ ЛА. Полученный авторами статьи экспериментальный график, по которому с точностью 10...12 % можно определить возможности электростатических полей  $E$  по предотвращению осадкообразования на нагреваемом рабочем участке в МАМ, т. е. величину  $D$ , при любых рабочих расстояниях между остриями рабочих соосных игл системы типа «игла–игла» — до начала зоны насыщения этих полей, представлен на рис. 10.



**Рис. 10.** Влияние электростатических полей  $E$  на предотвращение осадкообразования на нагреваемых металлических рабочих трубках в условиях вынужденной конвекции МАМ марки МС-20 в узком кольцевом канале при скорости его прокачки  $W = 1$  м/с, разных давлениях и фиксированном расстоянии между остриями соосных рабочих игл  $h_1 = 6 \cdot 10^{-3}$  м (1);  $h_2 = 8 \cdot 10^{-3}$  м (2);  $h_3 = 10 \cdot 10^{-3}$  м (3)



**Рис. 11.** Процесс осадкообразования на нагреваемой рабочей трубке в условиях вынужденной конвекции МАМ в узком кольцевом канале при включении электростатических полей  $E$ :

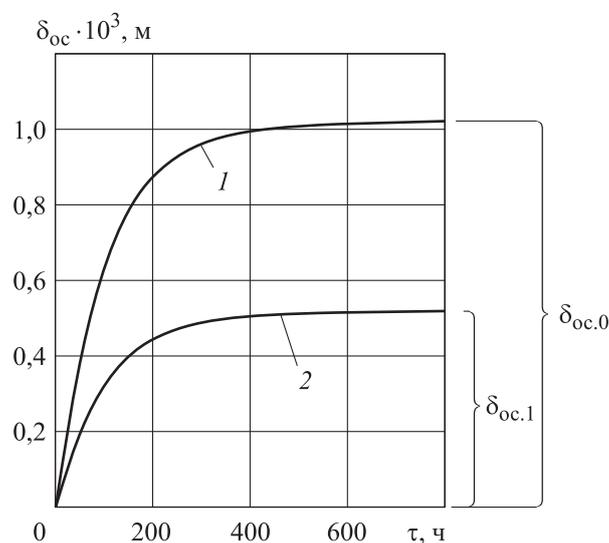
1 — график осадкообразования без включения электростатических полей  $E$ ; 2 — график осадкообразования при их включении через промежуток времени после запуска экспериментальной установки; 3 — график осадкообразования при их включении с начала эксперимента

Экспериментальные графики роста толщины твердого углеродистого осадка  $\delta_{ос}$  на рабочей нагреваемой трубке в условиях вынужденной конвекции МАМ марки МС-20 при различных ситуациях включения в работу электростатических полей  $E$  представлены на рис. 11. Видно, что без включения этих полей негативный процесс осадкообразования идет обычным путем (линия 1 на рис. 11), состоящий из активного участка, например, от 0 до 400 ч (циклов), когда рост слоя твердого углеродистого осадка происходит довольно быстро, и из пассивного участка, например, от 400 ч (циклов) до 800 ч (циклов) и более, когда рост осадка замедляется. Общая (итоговая) толщина твердого углеродистого осадка  $\delta_{ос.0}$  будет зависеть от общего (итогового) времени (циклов) работы двигателя и ЭУ ЛА. Подобные результаты ранее были получены авторами работ [2, 15–18] при экспериментах с жидкими УВГ и УВО и МАМ. При включении в работу электростатических полей  $E$  одновременно с началом нагрева рабочей трубки (линия 2 на рис. 11) в зоне прохождения силовых линий этих полей будет происходить процесс полного предотвращения осадкообразования, поэтому линия 2 совпала с осью абсцисс. На основе этого процесса был разработан новый способ предотвращения осадкообразования в МАМ при их вынужденной конвекции с помощью электростатических полей  $E$  в двигателях и ЭУ ЛА.

Если включить электростатические поля  $E$  после некоторого времени работы экспериментальной установки, например, после 50 ч

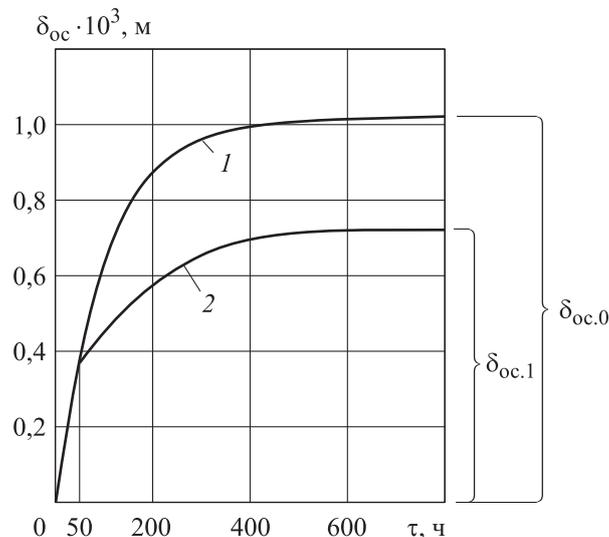
(циклов), когда на рабочей трубке уже будет образован некоторый слой твердого углеродистого осадка, то в зоне прохождения силовых линий этих полей будет происходить процесс ограничения дальнейшего роста осадка. Итоговая толщина осадка  $\delta_{oc.1}$  будет зависеть от продолжительности работы электростатических полей  $E$ . Данный процесс отображен линией 3 (см. рис. 11), на его основе был разработан новый способ ограничения осадкообразования в условиях вынужденной конвекции МАМ с помощью электростатических полей  $E$  в двигателях и ЭУ ЛА.

Экспериментальные графики роста толщины твердого углеродистого осадка  $\delta_{oc}$  на рабочей нагреваемой трубке в условиях вынужденной конвекции МАМ марки МС-20 при других разных ситуациях включения в работу электростатических полей  $E$  представлены на рис. 12. Кривая 1 на рисунке отображает процесс осадкообразования без включения в работу этих полей, как и линия 1 на рис. 11. Если электростатические поля  $E$  включить в работу одновременно с включением экспериментальной установки и нагревом рабочей трубки в импульсном (периодическом) режиме с разными интервалами отключения — включения, например, с интервалом 0,5 с, то даже за это малое время осадок уже успевает образовываться в зоне прохождения силовых линий электростатических полей  $E$ , т. е. итоговый процесс осадкообразования будет происходить медленнее (линия 2 на рис. 12).



**Рис. 12.** Процесс осадкообразования в авиационном моторном масле в условиях вынужденной конвекции при включении электростатических полей  $E$  в периодическом режиме:

1 — график осадкообразования без применения электростатических полей  $E$ ; 2 — график осадкообразования при их включении в периодическом режиме одновременно с включением экспериментальной установки



**Рис. 13.** Процесс осадкообразования в МАМ в условиях вынужденной конвекции при включении электростатических полей  $E$  в периодическом режиме через промежуток времени, например 50 ч (циклов) после запуска экспериментальной установки: 1 — график осадкообразования без применения электростатических полей  $E$ ; 2 — график осадкообразования при их включении в периодическом режиме через некоторое время, например, через 50 ч (циклов) после включения экспериментальной установки

На основе этого процесса был разработан новый способ замедления осадкообразования в условиях вынужденной конвекции МАМ с помощью электростатических полей  $E$  при их включении одновременно с запуском двигателей и ЭУ ЛА.

Экспериментальные графики увеличения толщины твердого углеродистого осадка  $\delta_{ос}$  на рабочей нагреваемой трубке в условиях вынужденной конвекции МАМ марки МС-20 при других различных ситуациях включения в работу электростатических полей  $E$  приведен на рис. 13). Кривая 1 на рисунке отображает процесс осадкообразования без включения в работу этих полей, как и линия 1 на рис. 11, 12. Если электростатические поля  $E$  включить в работу в импульсном (периодическом) режиме, но после некоторого времени работы экспериментальной установки, например, после 50 ч (циклов), когда на рабочей трубке уже будет образован некоторый слой твердого углеродистого осадка, то в зоне прохождения силовых линий этих полей будет происходить процесс замедления дальнейшего роста осадка. Данный процесс представлен линией 2 (см. рис. 13), на его основе был разработан новый способ замедления осадкообразования в условиях вынужденной конвекции МАМ с помощью электростатических полей  $E$  при их включении через некоторое время после запуска двигателя или ЭУ ЛА.

На основе результатов экспериментальных исследований и их анализа были разработаны общая методика применения электростатических полей  $E$  в МАМ, алгоритм и методики расчета осадкообразования в МАМ при их вынужденной конвекции без применения электростатических полей  $E$  и с их применением. Эти материалы будут приведены в следующем номере данного журнала.

**Заключение.** Впервые проведенные авторами статьи экспериментальные исследования являются новыми. Они позволили:

1) создать базу экспериментальных данных по влиянию поперечных электростатических полей  $E$  на осадкообразование в условиях вынужденной конвекции МАМ в узком кольцевом канале;

2) обнаружить возможности поперечных электростатических полей  $E$  по предотвращению, ограничению и уменьшению роста осадка в зоне прохождения силовых линий этих полей при различных вариантах их включения в работу и с разной скоростью прокачки МАМ в узком кольцевом канале при разном давлении;

3) обнаружить границу начала зоны насыщения электростатических полей  $E$  и саму зону, в которой дальнейшее повышение подаваемого высоковольтного электростатического напряжения не приводит к дальнейшему увеличению площади нагреваемого рабочего участка, предотвращенной от осадкообразования;

4) расширить классификацию способов и методов борьбы с осадкообразованием в МАМ, создав новые и перспективные способы — без применения электростатических полей  $E$ , с их применением, гибридно;

5) разработать и подать заявки на изобретения РФ на способы борьбы с осадкообразованием в МАМ, на новые конструктивные схемы масляных каналов, фильтров, форсунок, датчиков и систем контроля в системах смазки двигателей и ЭУ ЛА;

6) разработать общую методику применения электростатических полей  $E$  в МАМ, алгоритмы и методики расчета их влияния на осадкообразование в МАМ при их вынужденной конвекции, которые будут представлены в следующей статье данного журнала;

7) разработать планы дальнейших исследований.

Применение материалов данной статьи будет способствовать созданию новых систем смазки отечественных двигателей и ЭУ повышенных характеристик по ресурсу, надежности, эффективности, безопасности и экологичности.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бабкин В.И., Алексахин А.А., Яновский Л.С., Дунаев С.В., Хурумова А.Ф. Отечественные смазочные масла для авиационных газотурбинных двигателей: проблемы и перспективы. *Двигатель*, 2012, № 5 (83), с. 8–11.
- [2] Яновский Л.С., Харин А.А., Бабкин В.И. *Основы химмотологии*. Москва, Берлин, Директ-Медиа, 2016, 482 с.

- [3] Яновский Л.С., Ежов В.М., Молоканов А.А. Методология допуска авиационных масел к применению на авиатехнике в России и за рубежом. *Двигатель*, 2012, № 2 (80), с. 22–24.
- [4] Григорьев М.А., Бунаков Б.М., Долецкий В.А. *Качество моторного масла и надежность двигателей*. Москва, Изд-во стандартов, 1981, 232 с.
- [5] Боев А.А., Петрухин А.Г., Шкловец А.О. О перспективном подводе масла к подшипниковому узлу ГТД. *Изв. Самарского научного центра российской академии наук. Механика и машиностроение*, 2013, т. 15, № 6 (4), с. 1022–1026.
- [6] Туктамышева Ю.А. Анализ существующих и перспективных способов очистки масляной системы авиационного ГТД. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника*, 2012, № 33, с. 124–138.
- [7] Трянов А.Е. *Конструкция масляных систем авиационных двигателей*. Самара, Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007, с. 81.
- [8] Болога М.К., Бабой Н.Ф. Влияние электрического поля на теплообмен при кипении органических жидкостей. *Электронная обработка материалов*, 1967, № 3, с. 30–40.
- [9] Бабой Р.Ф., Болога М.К. Некоторые особенности процесса кипения в электрическом поле. *Электронная обработка материалов*, 1968, № 2, с. 57–70.
- [10] Федоненко А.И., Жакин А.И. Экспериментальные исследования электроконвективного движения в трансформаторном масле. *Магнитная гидродинамика*, 1982, № 3, с. 74–78.
- [11] Болога М.К., Гросу Ф.П., Кожухарь И.А. *Электроконвекция и теплообмен*. Кишинев, Изд-во «Штиинца», 1977, 320 с.
- [12] Апфельбаум М.С., Янговский Е.И. О силе, действующей от игольчатого электрода на слабопроводящий жидкий диэлектрик, и вызываемых ею течений. *Магнитная гидродинамика*, 1977, № 4, с. 73–80.
- [13] Миролубов Н.Н., Костенко М.В., Левинштейн М.Л., Тиходеев Н.Н. *Методы расчета электростатических полей*. Москва, Высшая школа, 1963, 416 с.
- [14] Остроумов Г.А. *Взаимодействие электрических и гидродинамических полей*. Москва, Наука, 1979, 320 с.
- [15] Алтунин В.А. *Исследование влияния электростатических и магнитных полей на особенности теплоотдачи к углеводородным горючим и охлаждаемым*. Книга вторая. Казань, Изд-во Казанского гос. ун-та им. В.И. Ульянова — Ленина, 2006, 230 с.
- [16] Алтунин В.А., Алтунин К.В., Гортышов Ю.Ф., Щиголов А.А., Юсупов А.А., Яновская М.Л. Влияние магнитных и электростатических полей на тепловые процессы в авиационных моторных маслах двигателей и энергоустановок летательных аппаратов. *Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева*, 2016, № 1, с. 21–31.
- [17] Алтунин В.А., Алтунин К.В., Алиев И.Н., Щиголов А.А., Платонов Е.Н. Разработка способов увеличения ресурса и надежности систем смазки двигателей внутреннего сгорания наземного транспорта. *Известия вузов. Машиностроение*, 2015, № 10 (667), с. 47–57.
- [18] Алтунин В.А., Алтунин К.В., Алиев И.Н., Щиголов А.А., Юсупов А.А. Исследование возможности применения магнитных и электростатических полей для борьбы с осадкообразованием в авиационных моторных маслах двигателей, энергоустановок и техносистем наземного, воздушного и аэрокосмического базирования. *Известия вузов. Машиностроение*, 2017, № 3 (684), с. 76–88.
- [19] Алтунин В.А., Львов М.В., Зырянов С.П., Яновская М.Л. Разработка экспериментальной базы для исследования тепловых процессов в авиационных

- моторных маслах. *Авиакосмические технологии (АКТ-2019): Тезисы XX Международной научно-технической конференции и школы молодых ученых, аспирантов и студентов*. Воронеж, Изд-во ООО Фирма «Элист», 2019, с. 11–12.
- [20] Львов М.В., Каськов А.С., Щиголов А.А., Мухаметшин А.А., Яновская М.Л., Алтунин В.А. Проблемы осадкообразования в системах смазки двигателей летательных аппаратов. *16-е Королевские чтения: Сборник материалов Международной молодежной научной конференции, посвященной 60-летию полета в космос Ю.А. Гагарина (5–7 октября 2021 г.)*. Самара, Изд-во Самарского ун-та, 2021, т. 1, с. 240–241.
- [21] Алтунин В.А., Львов М.В., Каськов А.С., Щиголов А.А., Яновская М.Л. Проблемы осадкообразования в системах смазки двигателей летательных аппаратов. *Материалы докладов 56-х Научных чтений, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К.Э. Циолковского: «Циолковский и прогресс науки и техники в 21 веке»*. Калуга, Изд-во «Эйдос», 2021, ч. 1, с. 220–224.
- [22] Алтунин В.А., Алтунин К.В., Львов М.В., Щиголов А.А., Алиев И.Н., Яновская М.Л. Проблемы систем смазки авиационных двигателей. *Тепловые процессы в технике*, 2021, т. 13, № 8, с. 357–384.
- [23] Алтунин В.А., Львов М.В., Щиголов А.А., Яновская М.Л. Разработка и создание экспериментальной установки для исследования особенностей тепловых процессов в условиях вынужденной конвекции моторных авиационных масел. *Авиация и космонавтика: Тезисы докладов 20-й Международной конференции (Москва, МАИ 22–26 ноября 2021 г.)*. Москва, Изд-во «Перо», 2021, с. 124–125.
- [24] Львов М.В., Алтунин В.А. Разработка экспериментальной установки для исследования влияния электростатических полей на тепловые процессы в моторных авиационных маслах в условиях вынужденной конвекции. *46-е Академические чтения по космонавтике. Секция № 7: «Развитие космонавтики. Фундаментальные проблемы газодинамики, горения и теплообмена»*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022, т. 1, с. 458–460.
- [25] Алтунин В.А., Львов М.В., Щиголов А.А., Юсупов А.А., Яновская М.Л. Экспериментальная установка для исследования влияния электростатических полей на теплообмен и процесс осадкообразования в моторном авиационном масле при его вынужденной конвекции. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 7, с. 113–123, <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2023-7-113-123>
- [26] Алтунин В.А., Львов М.В., Юсупов А.А., Кореев Е.П., Яновская М.Л. Экспериментальные исследования тепловых процессов в моторных авиационных маслах в условиях их вынужденной конвекции. *Сборник материалов 2-го Всероссийского научно-технического форума по двигателям и энергетическим установкам имени Н.Д. Кузнецова (Самара, 10-11 октября 2024 г.)*. Самара, Изд-во Самарского университета, 2024, с. 92–94.
- [27] Львов М.В., Юсупов А.А., Алтунин В.А. Результаты экспериментального исследования тепловых процессов в моторных авиационных маслах при их естественной и вынужденной конвекции. *Материалы Всероссийской молодежной научной конференции с международным участием «17 Королевские чтения», посвященной 35-летию со дня первого полета МКТС «Энергия — Буран» (3–5 октября 2023 г., г. Самара)*. Самара, Изд-во Самарского университета, 2023, т. 1, с. 203–204.
- [28] Алтунин В.А., Львов М.В., Юсупов А.А., Щиголов А.А., Пукачев И.Р., Яновская М.Л. Результаты экспериментальных исследований тепловых

- процессов в условиях вынужденной конвекции моторного авиационного масла марки МС-20. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2023, вып. 6. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2023-6-2285>
- [29] Алтунин В.А., Львов М.В., Юсупов А.А., Щиголев А.А., Гортышов Ю.Ф., Кореев Е.П., Яновская М.Л. Результаты экспериментального исследования влияния электростатических полей на тепловые процессы в моторном авиационном масле марки МС-20 в условиях его вынужденной конвекции. Часть 1. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2023, вып. 11. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2023-11-2317>
- [30] Алтунин В.А., Львов М.В., Юсупов А.А., Щиголев А.А., Гортышов Ю.Ф., Кореев Е.П., Яновская М.Л. Результаты экспериментального исследования влияния электростатических полей на тепловые процессы в моторном авиационном масле марки МС-20 в условиях его вынужденной конвекции. Часть 2. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2023, вып. 12. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2023-12-2324>
- [31] Алтунин В.А., Львов М., Юсупов А.А., Щиголев А.А., Гортышов Ю.Ф., Кореев Е.П., Яновская М.Л. Методики расчета влияния электростатических полей на теплоотдачу к моторному авиационному маслу марки МС-20 в условиях его вынужденной конвекции. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2024, вып. 7. EDN KVVODU
- [32] Алтунин В.А., Демиденко В.П., Львов М.В., Каськов А.С., Щиголев А.А., Яновская М.Л. Применение результатов экспериментальных исследований для создания новых конструктивных схем систем смазки двигателей летательных аппаратов воздушного и аэрокосмического базирования. *Труды 53 Научных чтений, посвященных памяти К.Э. Циолковского. Секция № 2: «Проблемы ракетной и космической техники».* (Калуга, 18–19 сентября 2018 г.). Казань, Изд-во Казанского университета, 2019, с. 160–176.
- [33] Алтунин В.А., Львов М.В., Щиголев А.А., Каськов А.С. Разработка новых конструктивных схем систем смазки двигателей летательных аппаратов воздушного и аэрокосмического применения *Инновационные технологии и технические средства специального назначения: труды двенадцатой общерос. науч.-практ. конф. В 3 т. Т. 1.* Санкт-Петербург, Балт. гос. техн. ун-т, 2020, с. 312–313. (Библиотека журнала «Военмех. Вестник БГТУ», № 62).
- [34] Алтунин В.А., Львов М.В., Гинятуллин И.А., Каськов А.С., Платонов Е.Н., Щиголев А.А., Яновская М.Л. Разработка топливно-масляных теплообменных аппаратов для двигателей воздушных и аэрокосмических летательных аппаратов. *Труды 55 чтений, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К.Э. Циолковского (г. Калуга, 15–16 сентября 2020 г.).* Казань, Изд-во Казанского университета, 2021, с. 86–94.
- [35] Алтунин В.А., Алтунин К.В., Абдуллин М.Р., Львов М.Л., Щиголев А.А., Платонов Е.Н., Юсупов А.А., Алиев И.Н., Яновский Л.С., Яновская М.Л. Некоторые пути совершенствования двигателей и энергоустановок марки «НК». Часть II. *Тепловые процессы в технике*, 2022, т. 14, № 1, с. 9–21. DOI: 10.34759/tpt-2022-14-1-9-21
- [36] Алтунин В.А., Львов М.В., Юсупов А.А., Кореев Е.П., Щиголев А.А., Яновская М.Л. Совершенствование масляных форсунок воздушно-реактивных двигателей. *Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества: сборник тезисов докладов.* Москва, ИД Академии Жуковского, 2023, с. 53–54.
- [37] Алтунин В.А., Львов М.В., Юсупов А.А., Селянин К.А., Щиголев А.А., Яновская М.Л. Экспериментальные исследования влияния электростатических полей на тепловые процессы в моторных авиационных маслах в условиях их вынужденной конвекции. *Перспективы развития двигателестро-*

*ения: Материалы международной научно-технической конференции имени Н.Д. Кузнецова, 18–20 июня 2025 г. Самара, Изд-во Самарского университета, 2025, с. 122–124.*

- [38] Алтунин В.А., Юсупов А.А., Львов М.В., Кореев Е.П., Жилиякова А.Е., Яновская М.Л. Исследование возможности применения электростатических полей для борьбы с осадкообразованием на топливных и масляных металлических фильтрах двигателей летательных аппаратов и наземных энергоустановок. *Перспективы развития двигателестроения: материалы международной научно-технической конференции имени Н.Д. Кузнецова, 18–20 июня 2025 г. Самара, Изд-во Самарского университета, 2025, с. 125–127.*

Статья поступила в редакцию 12.08.2025

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Алтунин В.А., Львов М.В., Алтунин К.В., Юсупов А.А., Щиголов А.А., Яновская М.Л. Результаты экспериментального исследования влияния электростатических полей на процесс осадкообразования в моторном авиационном масле марки МС-20 в условиях его вынужденной конвекции в кольцевом канале. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2025, вып. 10. EDN MPJGDM

**Алтунин Виталий Алексеевич** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Теплотехники и энергетического машиностроения», Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ; академик Российской академии космонавтики им. К.Э. Циолковского (РАКЦ), президент Казанского регионального отделения РАКЦ (КазРО РАКЦ), Заслуженный изобретатель Республики Татарстан. e-mail: altspacevi@yahoo.com

**Львов Михаил Валерьевич** — аспирант кафедры «Теплотехники и энергетического машиностроения», Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ. e-mail: miha.lev@mail.ru

**Алтунин Константин Витальевич** — д-р техн. наук, доцент кафедры «Теплотехники и энергетического машиностроения», Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ. e-mail: altkonst881@yandex.ru

**Юсупов Артур Альбертович** — аспирант кафедры «Теплотехники и энергетического машиностроения», Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ. e-mail: Ar\_yusupov@mail.ru

**Щиголов Александр Александрович** — докторант Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева — КАИ. e-mail: aleksandr.shigolew@yandex.ru

**Яновская Мария Леонидовна** — канд. техн. наук, младший научный сотрудник ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова». e-mail: maria-yanovskaya-ww@yandex.ru

## **Experimental study results of the electrostatic fields influence on sedimentation process in the MS-20 aviation motor oil under conditions of its forced convection in the annular channel**

© V.A. Altunin<sup>1</sup>, M.V. Lvov<sup>1</sup>, K.V. Altunin<sup>1</sup>, A.A. Yusupov<sup>1</sup>,  
A.A. Shchigolev<sup>1</sup>, M.L. Yanovskaya<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI,  
Kazan, 420111, Russian Federation

<sup>2</sup> Central Institute of Aviation Motors, Moscow, 111116, Russian Federation

*The paper presents experimental study results of the electrostatic fields influence on deposition process in the MS-20 aviation motor oil under conditions of its forced convection in the narrow annular channel using a system of the “needle–needle” working electrodes positioned perpendicular to the oil flow. The paper shows that solid carbon is not depositing in the passage zone of the electrostatic field force lines. It reveals complex thermodynamic conditions of the aviation motor oils in the aircraft engine and power plant lubrication systems. Negative deposition impact on operation of the aircraft engine and power plant lubrication systems is analyzed. The paper shows capabilities of the electrostatic fields when used to combat deposition in the aviation motor oils under conditions of their forced convection in the narrow annular channel. They include simultaneous cut-in with the experimental setup; late cut-in; pulsed cut-in with or without polarity reversal on the working coaxial needles. The paper provides a complete classification of the existing and promising (new) methods and techniques for combating deposit formation in the aircraft engine and power plant lubrication systems. An experimental database has been created on the electrostatic fields capabilities to prevent, limit, and slow the hard carbon deposit growth on the heated parts under forced convection conditions of the aviation motor oils in lubrication systems of the domestic aircraft engines and power plants. Application of the materials provided in this paper would contribute to expansion and deepening the knowledge about deposit formation and methods for combating it in the new and promising lubrication systems of the domestic high-performance aircraft engines and power plants.*

**Keywords:** *aircraft engine and power plant lubrication systems, aviation motor oil, forced convection, thermal processes, narrow annular channel, heated metal tube, temperature, pressure, pumping speed, sedimentation, electrostatic fields, coaxial working needles*

### REFERENCES

- [1] Babkin V.I., Aleksashin A.A., Yanovsky L.S., Dunaev S.V., Khurumova A.F. Otechestvennye smazochnye masla dlya aviatsionnykh gazoturbinnnykh dvigateley; problemy i perspektivy [Domestic lubricants for aviation gas turbine engines: problems and prospects]. *Dvigatel — Engine*, 2012, no. 5 (83), pp. 8–11.
- [2] Yanovsky L.S., Kharin A.A., Babkin V.I. *Osnovy khimmotologii* [Fundamentals of chemotology]. Moscow, Berlin, Direkt-Media Publ., 2016, 482 p.
- [3] Yanovsky L.S., Ezhov V.M., Molokanov A.A. Metodologiya dopuska aviatsionnykh masel k primeneniyu na aviatekhnikе v Rossii i za rubezhom [Methodology of the admission of aviation oils to application on aviation equipment in Russia and abroad]. *Dvigatel — Engine*, 2012, no. 2 (80), pp. 22–24.

- [4] Grigoryev M.A., Bunakov B.M., Doletsky V.A. *Kachestvo motornogo masla i nadezhnost dvigateley* [Quality of motor oil and reliability of engines]. Moscow, Izdatelstvo Standartov, 1981, 232 p.
- [5] 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]. *Izvestia Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk. Mekhanika i mashinostroenie — Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Mechanics and Mechanical Engineering*, 2013, vol. 15, no. 6 (4), pp. 1022–1026.
- [6] Tuktamysheva Yu.A. Analysis of existing and promising methods for cleaning of aviation GTE oil system]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika — PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*, 2012, no. 33, pp. 124–138.
- [7] Tryanov A.E. *Konstruktsiya maslyanykh sistem aviatsionnykh dvigateley* [Design of the oil systems of aviation engines]. Samara, Samar. Gos. Aerokosm. Un-t Publ., 2007, 81 p.
- [8] Bologa M.K., Baboy N.F. Vliyanie elektricheskogo polya na teploobmen pri kipenii organicheskikh zhidkostey [The influence of electric field on heat transfer during boiling of the organic liquids]. *Elektronnaya obrabotka materialov — Electronic Processing of Materials*, 1967, no. 3, pp. 30–40.
- [9] Baboy R.F., Bologa M.K. Nekotorye osobennosti protsessa kipeniya v elektricheskoy pole [Certain features of the boiling process in the electric field]. *Elektronnaya obrabotka materialov — Electronic Processing of Materials*, 1968, no. 2, pp. 57–70.
- [10] Fedonenko A.I., Zhakin A.I. Eksperimentalnye issledovaniya elektrokonvektivnogo dvizheniya v transformatornom masle [Experimental studies of electroconvective motion in the transformer oil]. *Magnitnaya gidrodinamika — Magnetohydrodynamics*, 1982, no. 3, pp. 74–78.
- [11] Bologa M.K., Grosu F.P., Kozhukhar I.A. *Elektrokonvektsiya i teploobmen* [Electroconvection and heat transfer]. Chisinau, Shtiintsa Publ., 1977, 320 pp.
- [12] Apfelbaum M.S., Yantovsky E.I. O sile, deystvuyushchey ot igolchatogo elektroda na slaboprovodnyy zhidkiy datchik, i vyzyvaemykh eyu techeniyakh [On the force acting from a needle electrode on a weakly conducting liquid dielectric and the flows caused by it]. *Magnitnaya gidrodinamika — Magnetohydrodynamics*, 1977, no. 4, pp. 73–80.
- [13] Mirolyubov N.N., Kostenko M.V., Levinshtein M.L., Tikhodeev N.N. *Metody rascheta elektrosticheskikh poley* [Methods for calculating electrostatic fields]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1963, 416 p.
- [14] Ostroumov G.A. *Vzaimodeystvie elektricheskikh i gidrodinamicheskikh poley* [Interaction of electric and hydrodynamic fields]. Moscow, Nauka Publ., 1979, 320 p.
- [15] Altunin V.A. *Issledovanie vliyaniya elektrosticheskikh i magnitnykh poley na osobennosti teplootdachi k uglevodorodnym goryuchim i okhladitelyam. Kn. 2* [Investigation of the influence of electrostatic and magnetic fields on the characteristics of heat transfer to hydrocarbon fuels and coolants. Book 2]. Kazan, Kazanskiy Gos. Un-t im. V.I. Ulyanova–Lenina Publ., 2006, 230 p.
- [16] Altunin V.A., Altunin K.V., Gortyshov Yu.F., Shchigolev A.A., Yusupov A.A., Yanovskaya M.L. Vliyanie magnitnykh i elektrosticheskikh poley na teplovye protsessy d aviatsionnykh motornykh maslakh dvigateley i energoustanovok letatelnykh apparatov [Influence of magnetic and electrostatic fields on thermal processes in the aviation motor oils of the aircraft engines and power plants]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. A.N. Tupoleva — Vestnik of KNRTU n.a. A.N. Tupolev*, 2016, no. 1, pp. 21–31.

- [17] Altunin V.A., Altunin K.V., Aliev I.N., Shchigolev A.A., Platonov E.N. Razrabotka sposobov uvelicheniya resursa i nadezhnosti sistem smazki dvigateley vnutrennego sgoraniya nazemnogo transporta [Methods of life-extension and increase of reliability of lubrication systems in internal combustion engines used in ground transportation]. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie — BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2015, no. 10 (667), pp. 47–75.
- [18] Altunin V.A., Altunin K.V., Aliev I.N., Shchigolev A.A., Yusupov A.A. Issledovanie vozmozhnosti primeneniya magnitnykh i elektrostatiicheskikh poley dlya borby s osadkoobrazovaniem v aviatsionnykh motornykh maslakh dvigateley, energoustanovok i tekhnosistem nazemnogo, vozdušnogo i aerokosmicheskogo bazirovaniya [Researching the possible use of magnetic and electrostatic fields to address the problem of deposit formation in aviation oil for engines, power plants and technical systems of aircraft for aerial and aerospace use]. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie — BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2017, no. 3 (684), pp. 76–88.
- [19] Altunin V.A., Lvov M.V., Zyryanov S.P., Yanovskaya M.L. Razrabotka eksperimentalnoy bazy dlya issledovaniya teplovykh protsessov v aviatsionnykh motornykh maslakh [Development of an experimental base for studying thermal processes in the aviation motor oils]. *Aviakosmicheskie tekhnologii (AKT-2019): Tezisy XX Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii shkoly molodykh uchenykh, aspirantov i studentov* [Aerospace Technologies (AKT-2019): Abstracts of the XX International scientific and technical conference and school of young scientists, graduate students and students]. Voronezh, OOO Firma “Elist” Publ., 2019, pp. 11–12.
- [20] Lvov M.V., Kaskov A.S., Shchigolev A.A., Mukhametshin A.A., Yanovskaya M.L., Altunin V.A. Problemy osadkoobrazovaniya v sistemakh smazki dvigateley letatelnykh apparatov [Problems of sediment formation in lubrication systems of the aircraft engines]. *16-e Korolevskie chteniya: Sbornik materialov Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchnoy konferentsii, posvyashchennoy 60-letiyu poleta v kosmos Yu.A. Gagarina (5–7 oktyabrya 2021 g.)* [16<sup>th</sup> Korolev Readings: Collection of materials of the International Youth Scientific Conference dedicated to the 60<sup>th</sup> anniversary of Yu.A. Gagarin's space flight (October 5–7, 2021)]. Samara, Samarskiy Universitet Publ., 2021, vol. 1, pp. 240–241.
- [21] Altunin V.A., Lvov M.V., Kaskov A.S., Shchigolev A.A., Yanovskaya M.L. Problemy osadkoobrazovaniya v sistemakh smazki dvigateley letatelnykh apparatov [Sediment formation problems in lubrication systems of the aircraft engines]. *Materialy dokladov 56 Nauchnykh chteniy posvyashchennykh razrabotke nauchnogo naslediya i razvitiyu idey K.E. Tsiolkovskogo “Tsiolkovsky i progress nauki i tekhniki v 21 veke”* [Proceedings of the reports of the 56<sup>th</sup> Scientific Readings dedicated to development of the scientific heritage and ideas of K.E. Tsiolkovsky: “Tsiolkovsky and progress of science and technology in the 21st century”]. Kaluga, “Eydos” Publ., 2021, part 1, pp. 220–224.
- [22] Altunin V.A., Altunin K.V., Lvov M.V., Shchigolev A.A., Aliyev I.N., Yanovskaya M.L. Problemy sistem smazki aviatsionnykh dvigateley [Problems of lubrication systems of the aviation engines]. *Teplovye protsessy v tekhnike — Thermal Processes in Engineering*, 2021, vol. 13, no. 8, pp. 357–384.
- [23] Altunin V.A., Lvov M.V., Shchigolev A.A., Yanovskaya M.L. Razrabotka i sozdanie eksperimentalnoy ustanovki dlya issledovaniya osobennostey teplovykh protsessov v usloviyakh vynuzhdennoy konveksii motornykh aviatsionnykh masel [Development and creation of an experimental setup for studying features of thermal processes under conditions of forced convection of the motor aviation oils]. *Aviatsiya i kosmonavtika: Tezisy dokladov 20 Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [Aviation and Space: Abstracts of the 20<sup>th</sup> International Scientific Conference]. Moscow, MAI Publ., 2021, pp. 11–12.

- narodnoy konferentsii (Moskva, MAI, 22–26 noyabrya, 2021)* [Aviation and Cosmonautics: Abstracts of the 20<sup>th</sup> International Conference (Moscow, MAI, November 22–26, 2021)]. Moscow, “Pero” Publ., 2021, pp. 124–125.
- [24] Lvov M.V., Altunin V.A. Razrabotka eksperimentalnoy ustanovki dlya issledovaniya vliyaniya elektrostaticeskikh poley na teplovye protsessy v motornykh aviatsionnykh maslakh v usloviyakh vynuzhdennoy konveksii [Design and development of an experimental setup for studying the influence of electrostatic fields on thermal processes in the motor aviation oils under the forced convection conditions]. *46 Akademicheskie chteniya po kosmonavtike* [46th Academic Readings on Cosmonautics]. Moscow, BMSTU Publ., 2022, vol. 1, pp. 458–460.
- [25] Altunin V.A., Lvov M.V., Shchigolev A.A., Yusupov A.A., Yanovskaya M.L. Eksperimentalnaya ustanovka dlya issledovaniya vliyaniya elektrostaticeskikh poley na teploobmen i protsess osadkoobrazovaniya v motornom aviatsionnom masle pri ego vynuzhdennoy konveksii [Experimental installation for the study of the influence of electrostatic fields on heat exchange and the process of sedimentation in motor aviation oil with its forced convection]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie — BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2023, no. 7, pp. 113–123.  
<https://doi.org/10.18698/0536-1044-2023-7-113-123>
- [26] Altunin V.A., Lvov M.V., Yusupov A.A., Koreev E.P., Yanovskaya M.L. Eksperimentalnye issledovaniya teplovykh protsessov v motornykh aviatsionnykh maslakh v usloviyakh ikh vynuzhdennoy konveksii [Experimental studies of thermal processes in the aviation motor oils under conditions of their forced convection]. *Sbornik materialov 2-go Vserossiyskogo nauchnogo foruma po dvigatelyam i energeticheskim ustanovkam imeni N.D. Kuznetsova (Samara, 10–11 oktyabrya 2024 g.)* [Collection of materials of the 2<sup>nd</sup> All-Russian Scientific and Technical Forum on Engines and Power Plants named after N.D. Kuznetsov (Samara, October 10–11, 2024)]. Samara, Samarskiy Universitet Publ., 2024, pp. 92–94.
- [27] Lvov M.V., Yusupov A.A., Altunin V.A. Rezultaty eksperimentalnogo issledovaniya teplovykh protsessov v motornykh aviatsionnykh maslakh pri ikh estestvennoy i vynuzhdennoy konveksii [Results of an experimental study of thermal processes in the motor aviation oils during their natural and forced convection]. *Materialy Vserossiyskoy molodezhnoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem “17 Korolevskie chteniya”, posvyashchennye 35-letiyu so dnya pervogo poleta MKTS “Energia-Buran” (3–5 oktyabrya 2023 g., g. Samara)* [Proceedings of the All-Russian youth scientific conference with international participation “17<sup>th</sup> Korolev readings” dedicated to the 35<sup>th</sup> anniversary of the first flight of the MKTS “Energia – Buran” (October 3–5, 2023, Samara)]. Samara, Samarskiy Universitet Publ., 2023, vol. 1, pp. 203–204.
- [28] Altunin V.A., Lvov M.V., Yusupov A.A., Shchigolev A.A., Pukachev I.R., Yanovskaya M.L. Rezultaty eksperimentalnykh issledovaniy teplovykh protsessov v usloviyakh vynuzhdennoy konveksii motornogo aviatsionnogo masla marki MS-20 [Results of experimental study of the thermal processes at forced convection of the MS-20 engine aviation oil]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2023, iss. 6.  
<https://doi.org/10.18698/2308-6033-2023-6-2285>
- [29] Altunin V.A., Lvov M.V., Yusupov A.A., Shchigolev A.A., Gortyshov Yu.F., Koreev E.P., Yanovskaya M.L. Rezultaty eksperimentalnogo issledovaniya vliyaniya elektrostaticeskikh poley na teplovye protsessy v motornom aviatsionnom masle marki MS-20 v usloviyakh ego vynuzhdennoy konveksii. Chast 1 [Results of an experimental study of the electrostatic fields' influence on

- thermal processes in the MS-20 aviation engine oil exposed to its forced convection. Part 1]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2023, iss. 11.  
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2023-11-2317>
- [30] Altunin V.A., Lvov M.V., Yusupov A.A., Shchigolev A.A., Gortyshov Yu.F., Koreev E.P., Yanovskaya M.L. Rezultaty eksperimentalnogo issledovaniya vliyaniya elektrosticheskikh poley na teplovy protsessy v motornom aviatSIONnom masle marki MS-20 v usloviyakh ego vynuZhdennoy konvektSii. Chast 2 [Results of an experimental study of the electrostatic fields' influence on thermal processes in the MS-20 aviation engine oil exposed to its forced convection. Part 2]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2023, iss. 12.  
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2023-12-2324>
- [31] Altunin V.A., Lvov M., Yusupov A.A., Shchigolev A.A., Gortyshov Yu.F., Koreev E.P., Yanovskaya M.L. Metodiki rascheta vliyaniya elektrosticheskikh poley na teplootdachu k motornomu aviatSIONnomu maslu marki MS-20 v usloviyakh ego vynuZhdennoy konvektSii [Methods for computing the electrostatic fields influence on heat transfer to the MS-20 motor aviation oil under conditions of its forced convection]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2024, iss. 7. EDN KVVODU
- [32] Altunin V.A., Demidenko V.P., Lvov M.V., Kaskov A.S., Shchigolev A.A., Yanovskaya M.L. Primenenie rezultatov eksperimentalnykh issledovaniy dlya sozdaniya novykh konstruktivnykh skhem sistem smazki dvigateley letatelnykh apparatov vozduShnogo i aerokosmicheskogo bazirovaniya [Application of the results of experimental studies to create new design schemes for lubrication systems for engines of aircraft and aerospace vehicles]. In: *Trudy 53 Nauchnykh chteniy, posvyasch. pamyati K.E. Tsiolkovskogo. (Kaluga, 18–19 sentyabrya 2018 g.)*. [Proceedings of the 53<sup>rd</sup> Scientific Readings dedicated to the memory of K.E. Tsiolkovsky. (Kaluga, September 18–19, 2018)]. Kazan, Kazanskiy Universitet Publ., 2019, pp. 160–176.
- [33] Altunin V.A., Lvov M.V., Shchigolev A.A., Kaskov A.S. Razrabotka novykh konstruktivnykh skhem sistem smazki dvigateley letatelnykh apparatov vozduShnogo i aerokosmicheskogo primeneniya [Development of new design schemes for lubrication systems for aircraft engines for air and aerospace applications]. *Innovatsionnye tekhnologii i tekhnicheskie sredstva spetsialnogo naznacheniya: trudy dvenadtsatoy obshcheros. nauch.-prakt. konf.* [Innovative technologies and technical means of special purpose: proceedings of the 12<sup>th</sup> All-Russian scientific and practical conference]. In 3 vol. Vol. 1. St. Petersburg, Balt. Gos. Tekhn. Un-t Publ., 2020, pp. 312–313 (Library of the Voenmekh Journal. Bulletin of BSTU, no. 62).
- [34] Altunin V.A., Lvov M.V., Ginyatullin I.A., Kaskov A.S., Platonov E.N., Shchigolev A.A., Yanovskaya M.L. Razrabotka toplivno-maslyanykh teploobmennykh apparatov dlya dvigateley vozduShnykh i aerokosmicheskikh letatelnykh apparatov [Development of the fuel-oil heat exchangers for engines of the air and aerospace vehicles]. *Trudy 55 chteniy, posvyashchennykh razrabotke i razvitiyu idey K.E. Tsiolkovskogo (Kaluga, 15–16 sentyabrya 2020 g.)* [Proceedings of the 55<sup>th</sup> readings devoted to development of the scientific heritage and ideas of K.E. Tsiolkovsky (Kaluga, September 15–16, 2020)]. Kazan, Kazanskiy Universitet Publ., 2021, pp. 86–94.
- [35] Altunin V.A., Altunin K.V., Abdullin M.R., Lvov M.L., Shchigolev A.A., Platonov E.N., Yusupov A.A., Aliev I.N., Yanovsky L.S., Yanovskaya M.L. Nekotorye puti sovershenstvovaniya dvigateley i energoustanovok marki “NK”. Chast II [Certain ways in improving engines and power plants of the NK brand.

- Part II]. *Teplovye protsessy v tekhnike — Thermal Processes in Engineering*, 2022, vol. 14, no. 1, pp. 9–21. <https://doi.org/10.34759/tpt-2022-14-1-9-21>
- [36] Altunin V.A., Lvov M.V., Yusupov A.A., Koreev E.P., Shchigolev A.A., Yanovskaya M.L. Sovershenstvovanie maslyanykh forsunok vozdušno-reaktivnykh dvigateley [Improvement of oil nozzles of the air-jet engines]. *Grazhdanskaya aviatsiya na sovremennom etape razvitiya nauki, tekhniki i obshchestva: sbornik tezisov dokladov* [Civil aviation at the present stage of development of science, technology and society: collection of abstracts]. Moscow, ID Akademii Zhukovskogo Publ., 2023, pp. 53–54.
- [37] Altunin V.A., Lvov M.V., Yusupov A.A., Selyanin K.A., Shchigolev A.A., Yanovskaya M.L. Eksperimentalnye issledovaniya vliyaniya elektrosticheskikh poley na teplovye protsessy v motornykh aviatsionnykh maslakh v usloviyakh ikh vynuuzhdennoy konveksii [Experimental studies of the influence of electrostatic fields on thermal processes in aviation motor oils under conditions of their forced convection]. *Perspektivy razvitiya dvigatelestroyeniya: materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii imeni N.D. Kuznetsova, 18–20 iyunya 2025 g., Samara* [Proceedings of the international scientific and technical conference named after N.D. Kuznetsov: Prospects for Development of the Engine Building, (June 18–20, 2025, Samara)]. Samara, Samarskiy Universitet Publ., 2025, pp. 122–124.
- [38] Altunin V.A., Yusupov A.A., Lvov M.V., Koreev E.P., Zhilyakova A.E., Yanovskaya M.L. Issledovanie vozmozhnosti primeneniya elektrosticheskikh poley dlya borby s osadkoobrazovaniem na toplivnykh i maslyanykh metallicheskiykh filtrakh dvigateley letatelnykh apparatov i nazemnykh energoustanovok [Study of a possibility of using electrostatic fields to combat sedimentation on fuel and oil metal filters of the aircraft engines and ground power plants]. *Perspektivy razvitiya dvigatelestroyeniya: materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii imeni N.D. Kuznetsova, 18–20 iyunya 2025 g., Samara* [Proceedings of the international scientific and technical conference named after N.D. Kuznetsov: Prospects for Development of the Engine Building, June 18–20, 2025, Samara)]. Samara, Samarskiy Universitet Publ., 2025, pp. 125–127.

**Altunin V.A.**, Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Heat Engineering and Power Engineering, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI; Academician of the Russian Academy of Cosmonautics named after K.E. Tsiolkovsky (RACTs); President, Kazan Regional Branch of the RACTs (KazRO RACTs); Honored Inventor of the Republic of Tatarstan. e-mail: [altspacevi@yahoo.com](mailto:altspacevi@yahoo.com)

**Lvov M.V.**, Postgraduate, Department of Heat Engineering and Power Engineering, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI.  
e-mail: [miha.lev@mail.ru](mailto:miha.lev@mail.ru)

**Altunin K.V.**, Dr. Sc. (Eng.), Associate Professor, Department of Heat Engineering and Power Engineering, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI. e-mail: [alkonst881@yandex.ru](mailto:alkonst881@yandex.ru)

**Yusupov A.A.**, Postgraduate, Department of Heat Engineering and Power Engineering, Kazan National Research and Technical University named after A.N. Tupolev – KAI.  
e-mail: [Ar\\_yusupov@mail.ru](mailto:Ar_yusupov@mail.ru)

**Shchigolev A.A.**, Doctoral Candidate, of Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI. e-mail: [aleksandr.shigolew@yandex.ru](mailto:aleksandr.shigolew@yandex.ru)

**Yanovskaya M.L.**, Cand. Sc. (Eng.), Junior Researcher, Central Institute of Aviation Motors. e-mail: [maria-yanovskaya-ww@yandex.ru](mailto:maria-yanovskaya-ww@yandex.ru)