

Авиационная и ракетно-космическая техника

УДК 536, 537, 621.45.00.11.030

Разработка экспериментальной установки для исследования особенностей влияния электростатических полей на тепловые и гидравлические процессы в жидких углеводородных горючих и моторных авиационных маслах двигателей летательных аппаратов

В.А. Алтунин¹, К.В. Алтунин¹, А.А. Юсупов¹, М.В. Львов¹,
А.А. Щиголев¹, Ю.Ф. Гортышов¹, М.Л. Яновская²

¹ Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ

² Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова

Development of an experimental setup to study features of the electrostatic fields influence on thermal and hydraulic processes in the liquid hydrocarbon fuel and aviation motor oils of the aircraft engines

V.A. Altunin¹, K.V. Altunin¹, A.A. Yusupov¹, M.V. Lvov¹,
A.A. Shchigolev¹, Yu.F. Gortyshov¹, M.L. Yanovskaya²

¹ Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI

² Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov

Раскрыты проблемы тепловых процессов в топливных и масляных охлаждающих и подающих каналах двигателей летательных аппаратов наземного, воздушного, аэрокосмического и космического базирования. Одной из главных и опасных проблем является процесс осадкообразования, из-за которого происходит частичное и полное закоксовывание топливных и масляных каналов, фильтров и форсунок, что приводит к различным нештатным ситуациям и авариям. К современным и перспективным способам борьбы с осадкообразованием относится применение электростатических полей. Рассмотрены проблемы, связанные с возможностями электростатических полей по предотвращению осадкообразования на металлических сетчатых полотнах и по их преодолению при малом размере ячеек. Обоснована необходимость разработки и создания экспериментальной установки для всестороннего исследования возможностей электростатических полей в жидких углеводородных горючих и моторных авиационных маслах при их естественной и вынужденной конвекции в различных

термодинамических условиях по давлению и температуре. Разработаны конструктивные схемы установки и рабочих участков, указаны рабочие параметры и этапы экспериментальных исследований, подведены предварительные итоги, показаны дальнейшие перспективные планы применения этой установки.

EDN: NSOENL, <https://elibrary/nsoenl>

Ключевые слова: двигатели летательных аппаратов, жидкие углеводородные горючие, моторные авиационные масла, электростатические поля, топливные и масляные фильтры

The paper considers problems of the thermal processes in the fuel and oil cooling and supply channels of the ground-, air-, aerospace- and space-based aircraft engines. Sediment formation is one of the key and dangerous problems causing partial or complete coking of the fuel and oil channels, filters, and injectors leading to various abnormal situations and accidents. Application of the electrostatic fields appears to be a modern and promising method in combating sediment formation. The paper analyzes problems associated with the electrostatic fields' potential to prevent sediment formation on the metal mesh screens and to overcome these problems using the small mesh sizes. It substantiates the need to design, develop and create an experimental setup for comprehensive study of the electrostatic fields' potential in the liquid hydrocarbon fuels and aviation motor oils under their natural and forced convection, and various thermodynamic pressure and temperature conditions. The paper presents the developed setup design diagrams and operating sections. It indicates operating parameters and stages of the experimental study, summarizes the preliminary results, and outlines the further promising plans for using this setup.

EDN: NSOENL, <https://elibrary/nsoenl>

Keywords: aircraft engines, liquid hydrocarbon fuels, aviation motor oils, electrostatic fields, fuel and oil filters

Исследование является продолжением статей, посвященных тепловым процессам в жидких углеводородных горючих (УВГ) и моторных авиационных маслах (ММ), а также способам борьбы с негативными тепловыми процессами в двигателях летательных аппаратов (ЛА) [1–44].

Одним из опасных и негативных процессов, происходящих в топливно-подающих, топливно-охлаждающих и смазывающих системах двигателей ЛА, является осадкообразование, из-за чего неожиданно и раньше положенного срока двигатели ЛА выходят из строя, создаются аварийные ситуации, происходят аварии с возникновением пожаров и взрывов, что отмечено в публикациях [2–5, 7, 8–17, 19–21, 23–33, 35–40, 42, 43]. Там же подробно описана негативность осадкообразования в воздушно-реактивных двигателях (ВРД), жидкостных ракетных двигателях (ЖРД), авиационных и наземных поршневых двигателях внутреннего сгорания (ДВС).

Другое опасное тепловое явление — термоакустические автоколебания (ТААК) давления, возникающие в каналах рубашек охлаждения ЖРД [8, 9, 13, 15, 25, 43]. Они способствуют образованию локально чередующихся зон пере-

гревов и прогаров рубашки охлаждения в области критического сечения сопла и откалыванию твердых углеродистых осадков с дальнейшим засорением каналов и форсунок, возникновением пожаров и взрывов, особенно при стендовых испытаниях.

Практически все двигатели ЛА оснащены различными фильтрами с металлическими сетками, которые в ходе эксплуатации топливных и масляных систем покрываются твердым углеродистым осадком, что также приводит к различным аварийным ситуациям и авариям.

Подробно изложена информация об условиях зарождения осадка в жидких УВГ и ММ, о существующих и перспективных способах борьбы с этим негативным и опасным явлением. Ранее установлено, что электростатические поля (ЭСП) способствуют предотвращению осадкообразования на нагреваемых деталях в среде жидкого УВГ и ММ. С помощью визуализации доказано, что электрический ветер (ЭВ) как разновидность ЭСП участвует в интенсификации тепломассообмена [9, 10, 12–14, 20–22, 31–37, 39, 41, 43].

Показаны особенности исследования ЭСП в различных средах [9, 10, 45–76], приведены ре-

зультаты экспериментальных исследований ЭСП в жидких УВГ и МАМ, где раскрыты особенности применения ЭСП для борьбы с осадкообразованием в двигателях ЛА, в том числе на металлических полотнох сетчатых фильтров [9, 10, 20–22, 28, 31–34, 41, 44].

Однако до сих пор неизвестно, как влияют ЭСП на осадкообразование и прохождение гидравлического факела ЭВ через ячейки металлического фильтровочного полотна малого размера (менее 1 мм) при различных термодинамических условиях по давлению, температуре и скорости прокачки рабочего тела (РТ). То есть необходимо определить границу применимости ЭСП в жидких УВГ и МАМ при создании эффективных и перспективных фильтрующих металлических систем двигателей ЛА, что можно определить только экспериментальным путем.

Показаны и обоснованы необходимость создания новой экспериментальной установки с применением ЭСП. Приведены конструктивные схемы и фотографии созданной установки с ее эксплуатационными характеристиками, описаны алгоритмы проведения экспериментальных исследований, намечены пути дальнейшего применения установки и различных рабочих участков (РУ) в научной работе по исследованию ЭСП в жидких УВГ и МАМ при их естественной и вынужденной конвекции в различных термодинамических условиях.

Анализ тепловых процессов в топливных, масляных и охлаждающих системах двигателей ЛА. Опыт эксплуатации ВРД на жидких УВГ показывает, что в топливных и масляных каналах, фильтрах и форсунках происходит негативный процесс осадкообразования [1–8, 24].

При частичном закоксовывании топливных форсунок, форсуночных фильтров и других деталей ВРД происходят такие процессы [3, 7, 8, 24, 29, 30, 35, 37], как частичная потеря тяги; нерасчетный струйный распыл жидкого УВГ с прогаром жаровой трубы, пожаром и взрывом (что возможно даже при одной неисправной форсунке); заедание и заклинивание деталей топливной аппаратуры системы управления ВРД с дальнейшим разносом и неуправляемостью.

При полном закоксовывании нескольких топливных форсунок может образоваться течь с дальнейшим пожаром и взрывом [1–8, 24, 30, 35, 37].

Осадкообразование в системах смазки ВРД также является весьма негативным процессом [4, 6, 14, 16, 19, 38, 40, 42]. Например, частичное закоксовывание только одной масляной форсунки ВРД приводит к нерасчетной смазке и охлаждению осевого подшипника турбины, частичному масляному голоданию, быстрому выходу из строя ВРД с созданием различных аварийных ситуаций. Полное закоксовывание неисправной масляной форсунки может стать причиной полного масляного голодания и ускоренного выхода из строя осевого подшипника турбины, а также сложных аварийных ситуаций, связанных с разрушением всего ВРД.

В ЖРД [3, 5, 7, 8, 13, 15, 23, 24, 27, 39, 43] интенсивное осадкообразование происходит в каналах рубашек охлаждения в зоне критического сечения сопла уже через 2...3 мин после его пуска, вследствие чего возникает аномальное и быстрое повышение температуры стенки канала с дальнейшим прогаром, пожаром и взрывом ЖРД.

В каналах рубашки охлаждения ЖРД возникают ТААК давления [8, 9, 13, 15, 25, 43], способствующие образованию локально чередующихся зон перегрева и прогара стенок каналов с дальнейшим взрывом ЖРД. Также ТААК давления способствуют откалыванию твердых углеродистых отложений, которые попадают в предфорсуночное пространство и способствуют засорению форсунок горючего ЖРД с дальнейшими негативными последствиями.

Установлено, что ЭСП способствуют подавлению и уничтожению ТААК давления. Особенно эти вопросы касаются перспективных ЖРД многофазового использования (ЖРДМИ) на жидких УВГ и охладителях.

Вследствие осадкообразования значительно сокращается ресурс и надежность поршневых ДВС авиационного и наземного применения [4, 12, 14, 30, 38, 40–42].

Ввиду высоких температур и давлений в камере сгорания ДВС во внутренних масляных подающих и охлаждающих каналах цилиндров и других подвижных частей активно происходит зарождение и рост твердых углеродистых осадков. В дизельных ДВС осадкообразование возникает еще и в топливных форсунках, а также в масляных форсунках, расположенных под поршнем. Осадкообразованию также подвержены топливные и масляные фильтры и теплообменники авиационных и наземных поршневых ДВС.

На основании изложенного можно заключить, что из-за осадкообразования в ДВС, ВРД и ЖРД одно- и многофазового использования возникают аварийные ситуации и аварии, связанные с преждевременным выходом из строя, пожаром и взрывом всего ЛА.

Негативный процесс осадкообразования происходит как в земных условиях, так и в космических.

Анализ способов борьбы с осадкообразованием в жидких УВГ и МАМ без применения и с применением ЭСП. Ранее была разработана и создана общая классификация способов борьбы с осадкообразованием в топливных и масляных системах двигателей ЛА, которые подразделены на существующие и перспективные; на удаляющие, уменьшающие, ограничивающие и предотвращающие осадок; без применения и с применением ЭСП и др. [1–9, 11–13, 17, 19–29, 31–44].

Одним из существующих способов борьбы с осадкообразованием в жидких УВГ и МАМ по его предотвращению являются антиосадкообразующие присадки, которые внедряют на нефтеперерабатывающих заводах. Но они действуют только до нагрева деталей или жидких УВГ и МАМ до температуры 200 °С (473 К), а далее твердый углеродистый осадок начинает появляться на всех нагретых металлических деталях топливно-охлаждающих, топливно-подающих, масляно-охлаждающих и масляно-подающих систем двигателей ЛА. Поэтому необходимо вести всестороннюю борьбу с этим негативным и опасным процессом.

Ранее [9, 10, 12–14, 20–22, 31–37, 39, 41, 43] были проведены всесторонние и глубокие экспериментальные исследования в жидких УВГ и МАМ при естественной и вынужденной конвекции, различных критических, до- и сверхкритических давлениях, при различных температурах, в том числе и более 200 °С (473 К). Установлено, что ЭСП способствуют интенсификации теплоотдачи к УВГ и МАМ, а также предотвращению осадкообразования в них.

Во всех исследованиях применялась система электродов «Игла — игла», так как она является базовой при исследовании ЭСП в различных жидких и газообразных средах почти для всех ученых, которые создали и создают, а также привязывают свои математические теории, методы, алгоритмы и формулы тепловых и гидравлических расчетов с ЭВ, эффективно образующимися и работающими при такой системе

электродов. При этом открывается возможность сравнения результатов исследований различных авторов.

Также важно, чтобы отдающий электрод, с которого эффективно истекает ЭВ при высоковольтном электростатическом напряжении, был выполнен в виде иглы. В то же время принимающий электрод может представлять собой не только иглу, но и кольцо, плоскость, решетку и т. д. Однако тогда будет меняться и конфигурация силовых линий ЭСП, гидродинамические и геометрические характеристики ЭВ. Впервые влияние ЭВ от игольчатого электрода в среде воздуха в 1899 г. описал Н.П. Мышкин [9, 10].

В различных жидких средах ЭСП изучали и исследовали отечественные и зарубежные ученые [9, 10, 45–76], но в качестве масляных сред они использовали только касторовое, трансформаторное, вазелиновое и рапсовое масла. Жидкой углеводородной средой являлись бытовая керосин, бензин, гексан, этилен, а также различные углеводородные смеси и суспензии (ацетон — бензол, дихлорэтан — бензол, вода — бензол и др.) как при атмосферном давлении, так и при его небольшом увеличении.

Влияние ЭСП на тепловые процессы в жидкостях и дисперсных системах описано в публикациях [45–59, 61–65]. В работе [60] применяли не только ЭСП, но и переменные с различными значениями частот, в разных диэлектрических химических жидкостях и растворах, на границах фаз различных сред, в сплошных и дисперсных средах.

Авторы трудов [66–76] проводили исследования ЭСП при распыливании жидкостей, создании и модернизации электростатических двигателей и магнитоплазмодинамических двигателей, при совершенствовании ионизаторов воздуха, плазменном электролизе растворов, электростатическом разделении сыпучих материалов и коронных разрядах на воздухе.

Ранее [9, 10, 20–22, 28, 31–34, 41, 44] применение ЭСП было включено в классификацию борьбы с осадкообразованием как новый и перспективный способ его предотвращения на нагреваемых металлических поверхностях, находящихся в среде жидкого УВГ или МАМ.

Топливные и масляные фильтры двигателей ЛА подвержены негативному процессу осадкообразования [2–5, 7–17, 19–21, 23–33, 35–40, 42, 43]: при нагреве жидкого УВГ или МАМ до температуры 100 °С (373 К) и более; при нагреве

до такой же температуры топливного или масляного фильтра и их металлических сеток; при одновременном нагреве до такой же температуры жидкого УВГ, МАМ и топливного или масляного фильтров.

Кроме того, фильтрующие металлические сетки забиваются частицами твердого углеродистого осадка, который образуется в жидком УВГ или МАМ, а также при его откалывании от нагреваемой металлической поверхности, например, в жидком УВГ при ТААК давления [8, 9, 13, 15, 25, 43].

Ранее были разработаны и запатентованы [8, 9, 11, 13, 16, 17, 23–27, 35, 36, 39] следующие технические решения:

- новые способы борьбы с осадкообразованием и его контроля без применения и с применением ЭСП в двигателях и энергоустановках ЛА на жидких и газообразных УВГ (патенты на изобретения РФ 2482413, 2467195, 2215671, 2194974, 2213291, 2289078, 2504676);

- новые конструктивные схемы топливных каналов и форсунок ВРД, ЖРД, ЖРДМИ без применения и с применением ЭСП (патенты на изобретения РФ 2155910, 2287715, 2388966, 2447362, 2452896, 2810865, 2806710);

- новые способы определения рабочих параметров ЭСП полей в жидких УВГ (патенты на изобретения РФ 2504843, 2785830, 2785251).

В ходе ранних экспериментальных исследований с жидкими УВГ ТС-1 и РГ-1 при их естественной и вынужденной конвекции [9] обнаружено, что предотвращение твердого углеродистого осадка происходит в зоне прохождения силовых линий ЭСП при любых давлениях.

На этой основе разработан и запатентован новый способ определения конфигурации распространения силовых линий ЭСП в жидких углеводородных средах, т. е. в жидких УВГ и их смесях (патент на изобретение РФ 2504843), где электродами (рис. 1) являются рабочие соосные иглы 1 и 4, удаленные друг от друга на расстояние h , между которыми расположена нагреваемая металлическая сетка 3 с ячейками крупного размера (1...3 мм). При нагреве с включенными ЭСП на ней образуется твердый углеродистый осадок 5, а в зоне прохождения силовых линий 2 поверхность сетки 6 (окружность с диаметром d , который равен максимальному расстоянию между внешними силовыми линиями ЭСП) остается чистой.

Такая система электродов названа системой «Игла — игла». В этом же изобретении показана

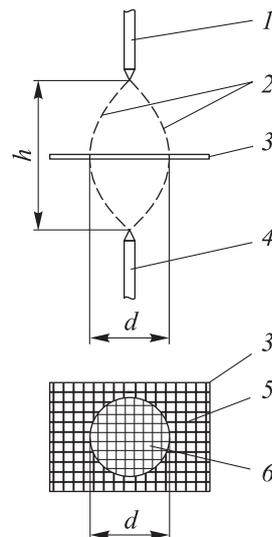


Рис. 1. Схема влияния ЭСП на предотвращение осадкообразования на нагреваемой металлической сетке

но, что другие электроды системы «Игла — плоский треугольник» и др. будут создавать на нагреваемой металлической сетке иные конфигурации распространения силовых линий ЭСП, а следовательно, и конфигурации площадей сетки, предотвращенных от осадкообразования.

Экспериментальные исследования по влиянию ЭСП на тепловые процессы в другом жидком УВГ, например в дизельном топливе, с металлическими пластинками, трубками и сетчатыми фильтровочными полотнами не проводились. Также отсутствуют сведения о возможности ЭВ в жидких УВГ преодолевать металлические сетчатые фильтровочные полотна с ячейками очень малого размера (с длиной стороны менее 1 мм).

При дальнейших экспериментальных исследованиях ЭСП в условиях естественной и вынужденной конвекции МАМ обнаружено, что и в МАМ предотвращение углеродистых твердых отложений на нагреваемых рабочих металлических пластинках и трубках также происходит в области прохождения силовых линий ЭСП при любых давлениях [12, 14, 16, 20–22, 35–37, 41]. Эксперименты с металлическими сетчатыми фильтровочными полотнами в объеме МАМ при влиянии ЭСП в условиях естественной и вынужденной конвекции при различных термодинамических условиях не проводились.

Поэтому необходимо экспериментально исследовать возможности ЭСП по борьбе с осадкообразованием на различных металлических сетчатых фильтровочных полотнах, из которых

изготовлены и будут изготавливаться форсуночные и другие штатные топливные и масляные фильтры двигателей ЛА.

Также необходимо экспериментально определить возможности ЭВ по гидравлическому преодолению металлических сетчатых фильтровочных полотен с очень малыми проходными ячейками в среде жидкого УВГ и МАМ. То есть требуется определить минимальные размеры ячеек металлической сетки, которые будут границей применимости ЭСП в жидких УВГ и МАМ при создании топливных и масляных металлических сетчатых фильтровочных систем с применением ЭСП в перспективных двигателях ЛА.

Предполагается, что ЭСП можно использовать для обеспечения вынужденной конвекции в топливных и масляных системах двигателей ЛА, а также для электрораспыления жидких УВГ и МАМ через топливные и масляные форсунки в аварийных ситуациях при отказе основных насосов [9, 10, 12–14, 20–22, 31–37, 39, 41, 43]. На эту тему также были получены патенты на изобретения РФ новых топливоподающих каналов и коллекторов ВРД, рубашек охлаждения ЖРД, систем охлаждения топливных форсунок ВРД и др.

Известно, что применение ЭСП в различных двигателях, энергоустановках (ЭУ) и техносистемах (ТС) способствует следующим положительным эффектам [9, 10, 12–14, 20–22, 31–37, 39, 41, 43]:

- в жидких УВГ — полной предтопливной подготовке, ионизации горючего с дальнейшим повышением полноты, качества и экологичности его сжигания; повышению ресурса, надежности, эффективности и экономичности двигателя, ЭУ и ТС;

- в смеси двух и более жидких УВГ — полной предтопливной подготовке (смешению, ионизации и гомогенизации, т. е. созданию нового горючего с новыми теплофизическими, энергетическими и теплообразующими свойствами); повышению полноты, качества и экологичности его сжигания; повышению ресурса, надежности, эффективности, выживаемости, неустойчивости и экономичности двигателя, ЭУ и ТС; это очень важно, особенно в сложных современных климатических и боевых условиях эксплуатации техники двойного назначения при ограниченных запасах какого-либо одного вида, типа и марки горючего или нескольких разных горючих;

- в МАМ — ионизации, поддержанию и восстановлению физических, теплофизических и технико-эксплуатационных свойств МАМ; увеличению ресурса МАМ; повышению ресурса, надежности, эффективности и экономичности двигателей, ЭУ и ТС двойного назначения;

- в смеси двух и более МАМ — ионизации, качественному смешению и гомогенизации, т. е. образованию МАМ нового вида с новыми смазывающими, теплофизическими, физическими и эксплуатационными свойствами; увеличению ресурса нового МАМ, повышению ресурса, надежности, выживаемости, неустойчивости, эффективности и экономичности двигателей, ЭУ и ТС двойного назначения.

Кроме того, по особенностям визуализации ЭВ [9] открывается возможность создания нового способа определения теплофизических свойств (ТФС) жидких УВГ и МАМ при различных термодинамических условиях.

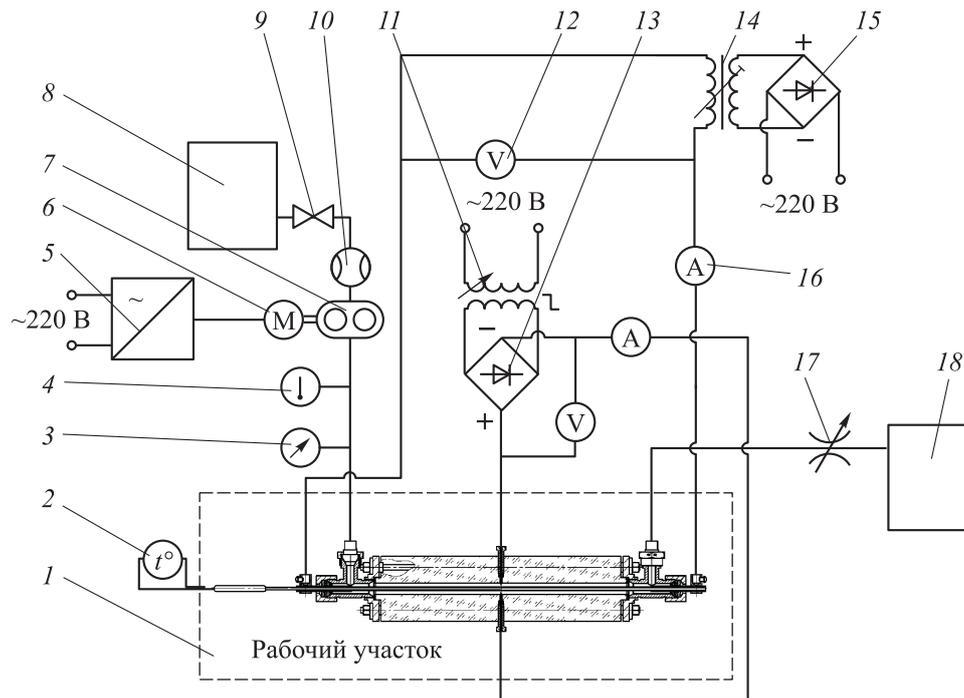
Поэтому экспериментальные исследования всех этих вопросов являются очень актуальными и необходимыми.

Цель статьи — разработка экспериментальной установки для исследования возможностей ЭСП по предотвращению негативного процесса осадкообразования на металлических сетчатых фильтровочных полотнах с ячейками различного размера и по их преодолению ЭВ в среде жидких УВГ и МАМ при естественной и вынужденной конвекции и различных термодинамических условиях по давлению и температуре.

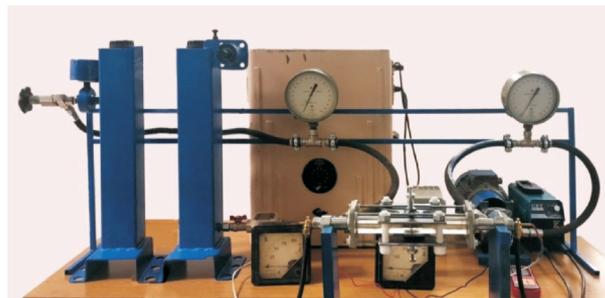
Описание новой экспериментальной установки и РУ. Для проведения всесторонних исследований ранее были созданы экспериментальные установки без применения и с применением ЭСП по обеспечению естественной и вынужденной конвекции жидких УВГ и естественной конвекции МАМ [77, 9, 10, 12–14, 20–22, 31–37, 39, 41, 43].

Для исследования процессов теплообмена и осадкообразования в приближенных к реальным условиям масляных системах двигателей ЛА также ранее разработана и создана экспериментальная установка (рис. 2, а и б) по обеспечению вынужденной конвекции МАМ без применения и с применением ЭСП. Эта установка подробно описана в предыдущих публикациях [19–22, 38, 40–42].

Экспериментальная установка (см. рис. 2, а) позволяет имитировать термогидродинамиче-



а



б

Рис. 2. Схема (а) и внешний вид (б) экспериментальной установки по вынужденной конвекции МАМ: 1 — РУ; 2 — цифровой термоэлектрический термометр; 3 — манометр; 4 — термометр; 5 — частотный преобразователь; 6 — электродвигатель; 7 — шестеренный насос; 8 и 18 — масляный и сливной баки; 9 — запорный кран; 10 — турбинный расходомер; 11 — ступенчатый повышающий трансформатор АФ-3; 12 — вольтметр; 13, 15 — выпрямители тока; 14 — регулируемый трансформатор тока; 16 — амперметр; 17 — регулируемый дроссель

ские условия движения МАМ в масляных каналах двигателей ЛА и исследовать влияние воздействия ЭСП при различных режимах на тепловые процессы в МАМ благодаря использованию сменных РУ.

Для создания новой экспериментальной установки по исследованию ЭСП в жидких УВГ и МАМ при естественной и вынужденной конвекции со сменными металлическими сетками использована установка (см. рис. 2, а), где вместо РУ 1 создан новый РУ (рис. 3) с такими же входными и выходными каналами и стыковочными патрубками 2, 15.

Новый РУ выполнен с окнами визуализации, рабочими электродами системы «Игла —

игла», различными сменными металлическими фильтровочными полотнами с ячейками размером 3,00...0,05 мм. Длина нового РУ — 200 мм, ширина — 110 мм, высота — 80 мм. Длина каждого окна визуализации — 80 мм, ширина — 45 мм. Геометрические размеры нового РУ и окон визуализации выбраны из условия обеспечения эффективной работы ЭСП и ЭВ при образовании электрогидравлического факела при естественной и вынужденной конвекции жидких УВГ и МАМ, а также из условия эффективной визуализации всех электрогидродинамических процессов с возможностью замеров геометрических характеристик ЭВ при его прохождении через съемные рабочие ме-

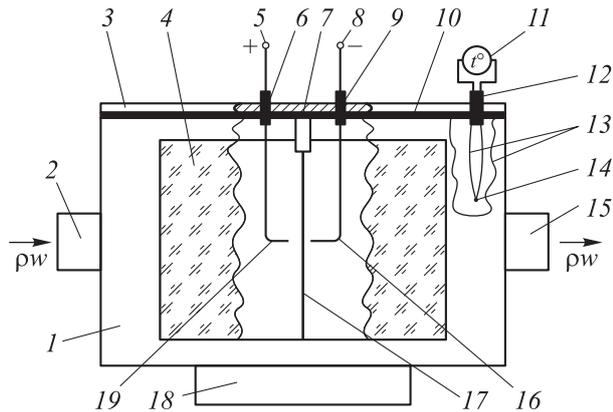


Рис. 3. Конструктивная схема нового РУ:
1 — корпус РУ; 2 и 15 — входной и выходной каналы;
3 — съемная крышка; 4 — окно визуализации;
5 и 8 — точки крепления контакта для подвода электростатического напряжения на отдающую и принимающую иглы; 6, 9 и 12 — гидроэлектроизоляция отдающей, и принимающей игл и термопары соответственно; 7 — стационарный держатель экспериментальной съемной металлической сетки;
10 — гидроизоляционная прокладка между крышкой и корпусом; 11 — датчик температуры; 13 — термопара; 14 — точка замера температуры; 16 и 19 — принимающая отдающая иглы; 17 — рабочая съемная металлическая сетка; 18 — подогревающее устройство

таллические фильтровочные сетки с ячейками разного размера.

Ранее установлено следующее [9, 10, 20–22, 28, 31–37, 41]:

- в жидких УВГ и МАМ скорость прокачки РТ $W = 6,0$ м/с является граничной, т. е. при таком ее значении ЭВ уже не способен влиять на тепловые процессы в них, так как все заряженные частицы РТ уносятся потоком;

- в жидких УВГ и МАМ при естественной и вынужденной конвекции с различными давлениями существуют зоны насыщения ЭСП, где дальнейшее увеличение подаваемого электростатического напряжения не приводит к росту коэффициента теплоотдачи и площади предотвращения осадкообразования;

- импульсное, т. е. периодичное включение ЭСП даже с малым интервалом задержки между включениями (0,5 с) приводит к появлению углеродистого осадка на нагреваемых металлических деталях в объемах жидких УВГ и МАМ при естественной и вынужденной конвекции с различными давлениями.

Результаты этих ранних исследований будут учтены при проведении предстоящих исследований с использованием ЭСП в новом РУ (рис. 4) [44].

Предельные параметры экспериментальной установки с новым РУ приведены в таблице.

Для создания ЭСП использован высоковольтный ступенчатый повышающий трансформатор АФ-3 (рис. 5), способный подавать на отдающую иглу электростатическое напряжение до 50 кВ.

Электростатическое напряжение, реально подаваемое на отдающую иглу в ходе экспериментов, повышается с 0 до 25...30 кВ через 5 кВ. Из результатов ранних исследований ЭСП в жидких УВГ и МАМ известно, что при подаче более 25...30 кВ в зависимости от расстояния между остриями соосных рабочих игл наступит зона насыщения ЭСП, поэтому данный рабочий предел является оптимальным и эффективным.

Расстояния между рабочими соосными иглами составляют 5, 10 и 15 мм. Также ранее

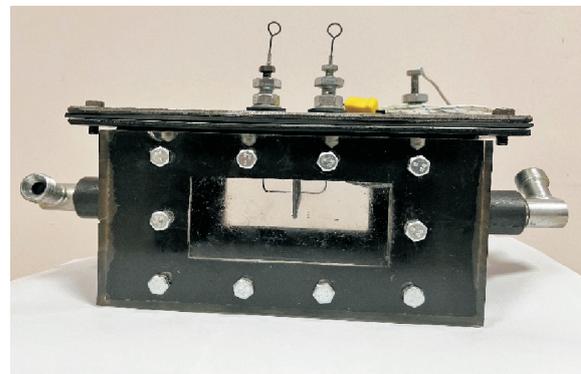


Рис. 4. Внешний вид нового РУ

Предельные параметры экспериментальной установки с новым РУ

Параметр	Значение	
	Минимальное	Максимальное
Давление МАМ и жидкого УВГ в установке, МПа	0,1	3,0
Скорость течения МАМ и жидкого УВГ в РУ, м/с	0	6,0
Температура МАМ и жидкого УВГ в РУ, К	293	493
Потребляемая электродвигателем мощность, Вт	500	3000
Напряжение ЭСП на отдающей игле, кВ	0	50
Расстояние между остриями рабочих соосных игл в РУ, мм	5	15
Размер сторон ячейки сменных металлических сеток, мм	0,05	3,00



Рис. 5. Внешний вид высоковольтного ступенчатого повышающего трансформатора АФ-3

установлено, что такие расстояния являются оптимальными и эффективными для обеспечения работы ЭВ по интенсификации теплоотдачи и предотвращению осадкообразования.

Согласно результатам предыдущих исследований ЭСП в жидких УВГ и МАМ, толщина рабочих соосных игл от 1 до 3 мм и угол заточки острия каждой иглы в диапазоне от 15 до 60° не влияют на конфигурацию распространения силовых линий ЭСП и работу ЭВ. Поэтому в новом РУ применены рабочие соосные иглы, выполненные из электропроводной сварочной проволоки толщиной 1,5 мм с углом заточки каждой иглы 30°.

Температура РТ (жидкого УВГ или МАМ) в новом РУ увеличивается через 20 °С (293 К) в диапазоне 20...220 °С (493 К), что обеспечивает нагрев сменной рабочей металлической сетки, а также появление на ней твердых углеродистых отложений. Давление в новом РУ повышается от 0,1 до 2,5 МПа через 0,5 МПа. Скорость прокачки РТ в РУ изменяется от 0 до 6 м/с через 1 м/с.

Этапы и порядок проведения экспериментов.

На первом этапе экспериментов будем исследовать жидкое УВГ в виде дизельного топлива, на втором — жидкое УВГ марки ТС-1, на третьем — МАМ марки МС-20.

Каждый этап сначала будем проводить в условиях естественной конвекции, затем — в условиях вынужденной.

Каждый эксперимент в условиях естественной конвекции РТ будем выполнять с конкретной металлической сеткой при известных геометрических характеристиках ячеек, с определением и установкой рабочих параметров

(расстояния между рабочими соосными иглами, температуры и давления РТ в РУ, температуры и давления внешней среды). Через окна визуализации будем осуществлять фото- и киносъемку тепловых и гидродинамических процессов без включения и с включением ЭСП.

После включения ЭСП при $U = 5$ кВ от отдающей иглы начнет появляться ЭВ с небольшим гидравлическим факелом, который будет увеличиваться при повышении подаваемого электростатического напряжения. Длину гидравлического факела будем измерять, а затем вносить в рабочий журнал при каждом электростатическом напряжении на отдающую иглу в конкретных термодинамических условиях жидких УВГ и МАМ.

При использовании металлических сеток с ячейками крупного размера (3,0; 2,0; 1,5 и 1,0 мм) ожидаем, что гидравлический факел ЭВ будет беспрепятственно проходить через них, а по мере уменьшения размера ячеек начнут возникать трудности. Возможно, что при малом размере ячеек (0,50; 0,10 и 0,05 мм) гидравлический факел ЭВ не сможет преодолеть эти препятствия. Такие предположения можно подтвердить только путем экспериментальных исследований.

При нагреве жидкого УВГ или МАМ до температуры 40 °С (313 К) в них появятся электрические заряды (жидкие РТ станут электропроводными), а при температуре 100 °С (373 К) — диполи, которые активно участвуют в осадкообразовании, т. е. эта температура является началом процесса осадкообразования [1–7, 9, 20–22, 28, 31–34, 41].

В ходе экспериментов будем выявлять особенности влияния ЭСП на предотвращение осадкообразования на различных металлических сетках. Вероятно, что при малом размере ячеек металлической сетки гидравлический факел ЭВ не сможет преодолеть ее полотно, но ЭСП смогут предотвратить осадкообразование на ней (в зоне прохождения силовых линий), т. е. ответить на этот вопрос можно только после экспериментальных исследований.

После каждого эксперимента (при конкретном электростатическом напряжении) будем выполнять разборку РУ с визуальным осмотром рабочей сменной металлической сетки с целью определения влияния ЭСП на предотвращение осадкообразования.

Предполагаем, что повышение температуры РТ будет способствовать увеличению длины

гидравлического факела в жидких УВГ и МАМ. Эксперименты будем проводить без металлических сеток при фиксированных значениях расстояния между соосными рабочими иглами, электростатического напряжения и величины повышения температуры и давления.

Результаты таких исследований станут основой для разработки новых способов определения ТФС жидких УВГ и МАМ. Также можно будет выявлять возможности ЭВ для применения в качестве гидравлического насоса в жидких УВГ и МАМ. Исходные данные и результаты каждого эксперимента будем заносить в рабочий журнал.

При экспериментах в условиях вынужденной конвекции будем использовать внешний электронасос, входящий в состав экспериментальной установки. Обеспечивая скорость прокачки РТ (например, $W = 1$ м/с), на отдающую иглу будем подавать фиксированные электростатические напряжения, начиная с $U = 5$ кВ.

При этом будем визуализировать, измерять и фиксировать в рабочем журнале длину гидравлического факела и другие рабочие параметры. Влияние ЭСП на предотвращение осадкообразования на рабочих металлических сетках будем определять после каждого эксперимента (при конкретных значениях скорости прокачки РТ и электростатического напряжения) и разборки РУ. Последующие эксперименты будем проводить при других скоростях прокачки РТ.

Возможности ЭСП и ЭВ в жидких УВГ и МАМ при естественной и вынужденной конвекции в различных термодинамических условиях с использованием и без использования металлических сеток можно определить только в ходе экспериментов.

Выводы

1. По результатам анализа тепловых процессов в топливных, масляных и охлаждающих системах двигателей ЛА раскрыты проблемы осадкообразования и ТААК давления. Подробно описаны существующие и перспективные способы борьбы с этими негативными тепловыми процессами. Установлено, что ЭСП способствуют интенсификации теплоотдачи к жидким УВГ и МАМ, предотвращению осадкообразования и уничтожению ТААК давления.

2. Показана необходимость создания нового РУ с ЭСП.

3. Рассмотрены состав экспериментальной установки с новым РУ и рабочие параметры экспериментального исследования. Новый РУ является уникальным [44], так как в нем можно проводить экспериментальные исследования с различными жидкими УВГ и МАМ при их естественной и вынужденной конвекции в различных термодинамических условиях без использования и с использованием ЭСП с системой электродов «Игла — игла», без применения сменных рабочих металлических сеток (с ячейками разного размер) и с их применением между рабочими соосными иглами.

4. Предложенная экспериментальная установка и РУ будут способствовать созданию:

- новой экспериментальной базы по возможностям ЭСП и ЭВ в жидких УВГ и МАМ при их естественной и вынужденной конвекции в различных термодинамических условиях;

- новой методики определения границ применимости сетчатых металлических фильтровочных полотен с малоразмерными ячейками для создания новых топливных и масляных фильтров двигателей ЛА при использовании в них ЭСП для борьбы с осадкообразованием;

- новых способов и методов определения ТФС жидких УВГ и МАМ при различных давлениях и температурах.

5. Разработанная экспериментальная установка позволяет проводить экспериментальные исследования:

- с рабочими сменными электродами разного типа («Игла — плоскость», «Игла — кольцо», «Игла — сетка», «Пучок игл — пучок игл» и др.);

- с различными жидкими УВГ;

- с разными МАМ;

- со смесями различных жидких УВГ в разных пропорциях;

- со смесями различных МАМ в разных пропорциях;

- со смесями жидких УВГ с МАМ в разных пропорциях.

6. Изложенные материалы о создании нового РУ, а также материалы последующих статей о результатах исследований будут способствовать созданию новой наземной, аэрокосмической и космической техники одно- и многофазового использования с повышенными показателями по ресурсу, надежности, эффективности, безопасности и экономичности.

Литература

- [1] Яновский Л.С., Дубовкин Н.Ф., ред. *Топлива для воздушно-реактивных двигателей*. Москва, Изд-во МАТИ, 2001. 441 с.
- [2] Дубовкин Н.Ф., Маланичева В.Г., Массур Ю.П. и др. *Физико-химические и эксплуатационные свойства реактивных топлив*. Москва, Химия, 1985. 240 с.
- [3] Яновский Л.С., Иванов В.Ф., Галимов Ф.М. и др. *Коксоотложения в авиационных и ракетных двигателях*. Казань, Абак, 1999. 284 с.
- [4] Алемасов В.Е., ред. *Инженерные основы авиационной химмотологии*. Казань, Изд-во Казанского ун-та, 2005. 714 с.
- [5] Яновский Л.С. Образование коксоотложений в тракте охлаждения ракетных двигателей, работающих на углеводородных горючих. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2006, № 3, с. 3–15. EDN: HVNBUN
- [6] Яновский Л.С., Харин А.А., Бабкин В.И. *Основы химмотологии*. Москва-Берлин, Директ-Медиа, 2016. 482 с.
- [7] Большаков Г.Ф. *Физико-химические основы образования осадков в реактивных топливах*. Ленинград, Химия, 1972. 231 с.
- [8] Алтунин В.А. *Исследование особенностей теплоотдачи к углеводородным горючим и охладителям в энергетических установках многократного использования. Кн. 1*. Казань. КГУ им. В.И. Ульянова-Ленина, 2005. 272 с.
- [9] Алтунин В.А. *Исследование влияния электростатических и магнитных полей на особенности теплоотдачи к углеводородным горючим и охладителям. Кн. 2*. Казань. КГУ им. В.И. Ульянова-Ленина, 2006. 230 с.
- [10] Altunin V.A., Altunin K.V., Aliev I.N. et al. Analysis of investigations of electric fields in different media and conditions. *J. Eng. Phys. Thermophy.*, 2012, vol. 85, no. 4, pp. 959–976, doi: <https://doi.org/10.1007/s10891-012-0736-4>
- [11] Алтунин К.В. Повышение ресурса реактивных двигателей на жидких углеводородных горючих. *Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева*, 2015, № 1–2, с. 37–42.
- [12] Алтунин В.А., Львов М.В., Гинятуллин И.А. и др. Разработка топливно-масляных теплообменных аппаратов для двигателей воздушных и аэрокосмических летательных аппаратов. *Научное значение трудов К.Э. Циолковского: история и современность. Ч. 1*. Калуга, Эйдос, 2020, с. 216–217.
- [13] Алтунин В.А., Алтунин К.В., Алиев И.Н. и др. *Некоторые пути повышения эффективности жидкостных реактивных двигателей летательных аппаратов на углеводородных и азотсодержащих горючих и охладителях*. Казань, Школа, 2020. 147 с.
- [14] Алтунин В.А., Алтунин К.В., Львов М.В. и др. Проблемы систем смазки авиационных двигателей. *Тепловые процессы в технике*, 2021, т. 13, № 8, с. 357–384, doi: <https://doi.org/10.34759/tpt-2021-13-8-357-384>
- [15] Алтунин В.А. Анализ тепловых процессов в жидких углеводородных горючих и охладителях двигателей летательных аппаратов. *46 Академические чтения по космонавтике. Т. 1*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022, с. 428–430.
- [16] Алтунин В.А., Львов М.В., Каськов А.С. и др. Проблемы осадкообразования в системах смазки двигателей летательных аппаратов. *Современные проблемы ракетной и космической техники. Сб. науч. ст. 56 научных чтений памяти К.Э. Циолковского*. Казань, Школа, 2022, с. 99–113.
- [17] Алтунин К.В. *Функционально-стоимостной анализ горелочных устройств и форсунок*. Казань, Изд-во КНИТУ-КАИ, 2020. 154 с.
- [18] Алтунин В.А., Львов М.В., ЩигOLEV А.А. и др. Расчет плотности моторного авиационного масла марки МС-20 при различных температурах и давлениях. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2023, № 2, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2023-2-2252>
- [19] Алтунин В.А., Львов М.В., Юсупов А.А. и др. Результаты экспериментальных исследований тепловых процессов в условиях вынужденной конвекции моторного авиационного масла марки МС-20. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2023, № 6, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2023-6-2285>
- [20] Алтунин В.А., Львов М.В., Юсупов А.А. и др. 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, № 11. EDN: IPBMWS
- [21] Алтунин В.А., Львов М.В., Юсупов А.А. и др. 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, № 12. EDN: HLESWT
- [22] Алтунин В.А., Львов М., Юсупов А.А. и др. 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, № 7. EDN: KVVODU
- [23] Алтунин В.А. *Влияние критических давлений на тепловые процессы в жидких углеводородных горючих и охладителях*. Казань, Школа, 2020. 209 с.
- [24] Алтунин В.А. *Свойства и негативность осадкообразования в двигателях и энергоустановках на жидких углеводородных горючих и охладителях*. Казань, Школа, 2020. 129 с.
- [25] Алтунин В.А. *Термоакустические автоколебания давления в каналах двигателей и энергоустановок*. Казань, Школа, 2020. 171 с.
- [26] Алтунин К.В. Разработка методики расчета температуры внутренней стенки форсунки с целью предотвращения осадкообразования. *Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева*, 2020, № 4, с. 32–38.
- [27] Алтунин К.В. Разработка новых удельных параметров реактивного двигателя. *Вестник МАИ*, 2020, т. 27, № 3, с. 146–154, doi: <https://doi.org/10.34759/vst-2020-3-146-154>
- [28] Алтунин К.В. Разработка критериального уравнения влияния электростатических полей на теплообмен и осадкообразование в среде керосина при естественной конвекции. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2021, № 1, doi: <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2021-1-2049>
- [29] Алтунин К.В. Разработка химического симплекса учета осадкообразования на стенках топливно-подающих каналов двигателей и энергоустановок. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2021, № 9, doi: <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2021-9-2110>
- [30] Алтунин К.В. Разработка новой методики расчета толщины слоя углеродсодержащих осадков в топливных каналах тепловых двигателей и энергоустановок. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2021, № 10, doi: <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2021-10-2119>
- [31] Алтунин К.В. Исследование влияния электростатических полей на теплоотдачу при естественной конвекции керосина. *Тепловые процессы в технике*, 2020, т. 12, № 9, с. 403–410, doi: <https://doi.org/10.34759/tpt-2020-12-8-403-410>
- [32] Алтунин К.В. Разработка методики расчета теплоотдачи при влиянии осадкообразования и электрической конвекции в среде керосина. *Тепловые процессы в технике*, 2022, т. 14, № 7, с. 325–334, doi: <https://doi.org/10.34759/tpt-2022-14-7-325-334>
- [33] Алтунин К.В. Разработка критериального уравнения вынужденного движения керосина с новым числом подобия электроконвекции. *Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева*, 2020, № 3, с. 30–33.
- [34] Алтунин К.В. Разработка критериев подобия электроконвекции в углеводородных средах. *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*, 2012, № 1-2, с. 168–171.
- [35] Алтунин В.А., Алтунин К.В., Абдуллин М.Р. и др. Некоторые пути совершенствования двигателей и энергоустановок марки «НК». Часть 1. *Тепловые процессы в технике*, 2021, т. 13, № 12, с. 530–542, doi: <https://doi.org/10.34759/tpt-2021-13-12-530-542>
- [36] Алтунин В.А., Алтунин К.В., Абдуллин М.Р. и др. Некоторые пути совершенствования двигателей и энергоустановок марки «НК» на жидких и газообразных углеводородных горючих. *Авиация и космонавтика. Тез. док. 20-й Межд. конф.* Москва, Перо, 2021, с. 86–88.
- [37] Алтунин В.А., Алтунин К.В., Абдуллин М.Р. и др. Некоторые пути совершенствования двигателей и энергоустановок марки «НК». Часть 2. *Тепловые процессы в технике*, 2022, т. 14, № 1, с. 9–21, doi: <https://doi.org/10.34759/tpt-2022-14-1-9-21>
- [38] Львов М.В., Юсупов А.А., Алтунин В.А. Результаты экспериментального исследования тепловых процессов в моторных авиационных маслах при их естественной и вы-

- нужденной конвекции. *17 Королевские чтения*. Т. 1. Самара. Изд-во Самарского университета, 2023, с. 203–204.
- [39] Алтунин В.А., Платонов Е.Н., Абдуллин М.Р. и др. Некоторые пути совершенствования жидкостных ракетных двигателей (100-летию со дня рождения академика В.Е. Алемасова — посвящается). *Идеи Циолковского в теориях освоения космоса. Мат. 58-х Научных чтений*. Ч. 1. Калуга, Наша полиграфия, 2023, с. 201–205.
- [40] Алтунин В.А., Львов М.В., Юсупов А.А. и др. Результаты экспериментального исследования тепловых процессов в системах смазки двигателей летательных аппаратов. *Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества. Сб. тез. док. Межд. науч.-тех. конф.* Москва, ИД Академии имени Н.Е. Жуковского, 2023, с. 51–52.
- [41] 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 Академические чтения по космонавтике*. Т. 1. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022, с. 458–460.
- [42] Алтунин В.А., Львов М.В., Щиголов А.А. и др. Экспериментальное исследование тепловых процессов при вынужденной конвекции авиационных моторных масел. В: *Современные проблемы ракетной и космической техники*. Казань, Школа, 2023, с. 204–218.
- [43] Алтунин В.А., Платонов Е.Н., Абдуллин М.Р. и др. Проблемы создания жидкостных ракетных двигателей многократного использования. *К.Э. Циолковский: ключевые идеи и современные достижения космонавтики. Мат. 59-х Научных чтений*. Ч. 1. Калуга, Эйдос, 2024, с. 178–182.
- [44] Алтунин В.А., Юсупов А.А., Львов М.В. и др. Создание экспериментальной установки по исследованию влияния электростатических полей на тепловые и гидравлические процессы в топливных и масляных фильтрах двигателей летательных аппаратов воздушного, аэрокосмического и космического базирования. *Сб. мат. 2-го Всерос. науч.-тех. форума по двигателям и энергетическим установкам имени Н.Д. Кузнецова*. Самара, Изд-во Самарского университета, 2024, с. 170–172.
- [45] Болога М.К., Бабой Н.Ф. Влияние электрического поля на теплообмен при кипении органических жидкостей. *Электронная обработка материалов*, 1967, № 3, с. 30–40.
- [46] Бабой Р.Ф., Болога М.К. Некоторые особенности процесса кипения в электрическом поле. *Электронная обработка материалов*, 1968, № 2, с. 57–70.
- [47] Бабой Р.Ф., Болога М.К. Теплообмен при кипении органических жидкостей в электрическом поле. В: *Тепло и массоперенос*. Т. 2. Минск, 1968, с. 197–204.
- [48] Болога М.К., Гросу Ф.П., Кожухарь И.А. *Электроконвекция и теплообмен*. Кишинев, Штиинца, 1977. 320 с.
- [49] Жакин А.И. Исследования электроконвекции и электроконвективного теплопереноса в жидких диэлектриках при униполярной инжекционной проводимости. *Известия АН СССР. Механика жидкости и газа*, 1988, № 2, с. 14–20.
- [50] Стишков Ю.К., Буянов А.В., Лазарев А.С. Моделирование структуры электродинамических течений в несимметричной системе электродов. *ЖТФ*, 2005, т. 75, № 5, с. 46–51.
- [51] Стишков Ю.К., Красильников С.Ю., Чирков В.А. Исследование электрогидродинамических течений в сверхсильных электрических полях. *Электронная обработка материалов*, 2012, № 48, с. 26–32.
- [52] Гросу Ф.П., Болога М.К. Особенности электризации слабопроводящей диэлектрической жидкости во внешнем электрическом поле. *Электронная обработка материалов*, 2006, № 4, с. 37–45.
- [53] Болога М.К., Кожевников И.В., Мардарский О.И. и др. Теплообмен при кипении в поле электрических сил. *Электронная обработка материалов*, 2012, № 4, с. 44–46.
- [54] Гросу Ф.П., Болога М.К. Электроизотермическая конвекция и ее роль в процессе теплообмена. *Электронная обработка материалов*, 2008, № 3, с. 25–35.
- [55] Мардарский О.И., Болога М.К. О механизме интенсификации теплообмена при кипении в поле электрических сил. *Электронная обработка материалов*, 2009, № 3, с. 42–48.
- [56] Миролубов Н.Н., Костенко М.В., Левинштейн М.Л. и др. *Методы расчета электростатических полей*. Москва, Высшая школа, 1963. 416 с.

- [57] Остроумов Г.А. *Взаимодействие электрических и гидродинамических полей*. Москва, Наука, 1979. 320 с.
- [58] Верещагин И.П., Левитов В.И., Мирзабекян Г.З. и др. *Основы электрогазодинамики дисперсных систем*. Москва, Энергия, 1974. 480 с.
- [59] Петриченко Н.А. Термические явления, сопровождающие электрический ветер в жидкостях. *Электронная обработка материалов*, 1973, № 6, с. 44–45.
- [60] Савиных Б.В., Гумеров Ф.М. *Свойства переноса диэлектрических жидкостей и теплообмена в электрических полях*. Казань, ФЭН, 2002. 384 с.
- [61] Семенов К.Н., Болога М.К., Видрашко В.К. Влияние электрического поля на конвективную теплоотдачу в неполярной жидкости. *Электронная обработка материалов*, 1966, № 2, с. 48–52.
- [62] Кожевников И.В., Болога М.К. Влияние электрогидродинамических течений на интенсификацию процессов тепло- и массообмена. Часть 1. Электрогидродинамические течения и характеристики одноступенчатых ЭГД насосов. *Электронная обработка материалов*, 2022, т. 58, № 1, с. 58–78, doi: <https://doi.org/10.52577/eom.2022.58.1.58>
- [63] Кожевников И.В., Болога М.К., Гросу Ф.П. Влияние электрогидродинамических течений на интенсификацию процессов тепло- и массообмена. Часть 3. Электроконвекция и электрогидродинамические насосы в системах охлаждения и термостатирования. *Электронная обработка материалов*, 2022, т. 58, № 3, с. 34–54, doi: <https://doi.org/10.52577/eom.2022.58.3.34>
- [64] Федоненко А.И., Жакин А.И. Экспериментальные исследования электроконвективного движения в трансформаторном масле. *Магнитная гидродинамика*, 1982, № 3, с. 74–78.
- [65] Апфельбаум М.С., Янтовский Е.И. О силе, действующей от игольчатого электрода на слабопроводящий жидкий диэлектрик, и вызываемых ею течениях. *Магнитная гидродинамика*, 1977, № 4, с. 73–80.
- [66] Kronig R., Schwarz N. On the theory of heat transfer from a wire in an electric field. *Appl. Sci. Res.*, 1949, vol. 1, pp. 35–54, doi: <https://doi.org/10.1007/BF02120314>
- [67] Senftleben E., Braun W. Der Einfluß elektrischer Felder auf den Wärmestrom in Gasen. *Z. Physik*, 1936, vol. 102, no. 7-8, pp. 480–506, doi: <https://doi.org/10.1007/BF01337819>
- [68] Atten P., Lacroix J.C. Non-linear stability of liquids subjected to unipolar injection. *Journal de Mecanique*, 1979, vol. 18, no. 3, pp. 469–510.
- [69] Worraker W.J., Richardson A.T. The effect of temperature — induced variations in charge carrier mobility on a stationary electrohydrodynamic instability. *J. Fluid Mech.*, 1979, vol. 93, no. 1, pp. 29–45, doi: <https://doi.org/10.1017/S0022112079001762>
- [70] Castellanos A., Atten P., Velarde M.G. Oscillatory and steady convection in dielectric liquid layers subjected to unipolar injection and temperature gradient. *Phys. Fluids*, 1984, vol. 27, no. 7, pp. 1607–1615, doi: <https://doi.org/10.1063/1.864816>
- [71] Pontiga F., Castellanos A., Richardson A.T. The onset of overstable motions in a layer of dielectric liquid subjected to the simultaneous action of a weak unipolar injection of charge and a thermal gradient. *Q. J. Mech. Appl. Math.*, 1992, vol. 45, no. 1, pp. 25–46, doi: <https://doi.org/10.1093/qjmam/45.1.25>
- [72] Koulova-Nenova D., Slavtchev S. Numerical study of electrohydrodynamic stability of dielectric liquid layers subjected to unipolar injection. *Mater. Sci.*, 1990, vol. 16, no. 4, pp. 53–59.
- [73] Koulova-Nenova D., Slavtchev S. Electrohydrodynamic stability of two dielectric liquid layers at unipolar injection. *Electrostatics*, 1991, Inst. Phys. Conf. Ser. No 118, IOP Publishing LTD, Bristol, 1991, pp. 317–322.
- [74] Chang J.S., Kelly A.J., Crowley J.M. *Handbook of electrostatic processes*. CRC Press, 2018.
- [75] Kelly A. The electrostatic atomization of hydrocarbons. *ICLASS-82*, 1982, pp. 57–65.
- [76] Iranshahi K., Defraeye T., Rossi R.M. et al. Electrohydrodynamics and its applications: Recent advances and future perspectives. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 2024, vol. 232, no. 5, art. 125895, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125895>
- [77] Шукин В.К., ред. *Теория и техника теплофизического эксперимента*. Москва, Энергоатомиздат, 1985. 360 с.

References

- [1] Yanovskiy L.S., Dubovkin N.F. ed. *Topliva dlya vozdushno-reaktivnykh dvigateley* [Fuels for air-jet engines]. Moscow, Izd-vo MATI Publ., 2001. 441 p. (In Russ.).
- [2] Dubovkin N.F., Malanicheva V.G., Massur Yu.P. et al. *Fiziko-khimicheskie i ekspluatatsionnye svoystva reaktivnykh topliv* [Physico-chemical and operational properties of jet fuels]. Moscow, Khimiya Publ., 1985. 240 p. (In Russ.).
- [3] Yanovskiy L.S., Ivanov V.F., Galimov F.M. et al. *Koksootlozheniya v aviatsionnykh i raketnykh dvigatelyakh* [Coke deposits in aviation and rocket engines]. Kazan, Abak Publ., 1999. 284 p. (In Russ.).
- [4] Alemasov V.E., ed. *Inzhenernyye osnovy aviatsionnoy khimologii* [Engineering bases of aviation chemotology]. Kazan, Izd-vo Kazanskogo un-ta Publ., 2005. 714 p. (In Russ.).
- [5] Yanovskiy L.S. Carbon deposition generation in cooling circuits of rocket engines with hydrocarbon fuel. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2006, no. 3, pp. 3–15. EDN: HVHBUN (In Russ.).
- [6] Yanovskiy L.S., Kharin A.A., Babkin V.I. *Osnovy khimologii* [Fundamentals of chemotology]. Moscow-Berlin, Direkt-Media Publ., 2016. 482 p. (In Russ.).
- [7] Bolshakov G.F. *Fiziko-khimicheskie osnovy obrazovaniya osadkov v reaktivnykh toplivakh* [Physico-chemical bases of sludge formation in jet fuels]. Leningrad, Khimiya Publ., 1972. 231 p. (In Russ.).
- [8] Altunin V.A. *Issledovanie osobennostey teplootdachi k uglevodorodnym goryuchim i okhladitelyam*. Kn. 1 [Study on heat dissipation properties to hydrocarbon fuels and coolants. Vol. 1]. Kazan, Kazanskiy gos. un-t im. V.I. Ulyanova-Lenina Publ., 2005, 272 p. (In Russ.).
- [9] Altunin V.A. *Issledovanie vliyaniya elektrosticheskikh i magnitnykh poley na osobennosti teplootdachi k uglevodorodnym goryuchim i okhladitelyam*. Kn. 2. Kazan, Kazanskiy gos. un-t im. V.I. Ulyanova-Lenina Publ., 2006. 230 p. (In Russ.).
- [10] Altunin V.A., Altunin K.V., Aliev I.N. et al. Analysis of investigations of electric fields in different media and conditions. *J. Eng. Phys. Thermophy.*, 2012, vol. 85, no. 4, pp. 959–976, doi: <https://doi.org/10.1007/s10891-012-0736-4>
- [11] Altunin K.V. Increase of life of jet engines operating upon liquid hydrocarbons. *Vestnik KGTU im. A.N. Tupoleva* [Vestnik of KNRTU n.a. A.N. Tupolev], 2015, no. 1-2, pp. 37–42. (In Russ.).
- [12] Altunin V.A., Lvov M.V., Ginyatullin I.A. et al. [Development of fuel-oil heat exchangers for air and aerospace aircraft engines]. *Nauchnoe znachenie trudov K.E. Tsiolkovskogo: istoriya i sovremennost*. Ch. 1 [Scientific Value of K.E. Tsiolkovsky Works: History and Modernity. P. 1]. Kaluga, Eydos Publ., 2020, pp. 216–217. (In Russ.).
- [13] Altunin V.A., Altunin K.V., Aliev I.N. et al. *Nekotorye puti povysheniya effektivnosti zhidkostnykh reaktivnykh dvigateley letatelnykh apparatov na uglevodorodnykh i azotosoderzhashchikh goryuchikh i okhladitelyakh* [Some ways to improve the efficiency of liquid jet engines of aircraft on hydrocarbon and nitrogen-containing fuels and coolants.]. Kazan, Shkola Publ., 2020. 147 p. (In Russ.).
- [14] Altunin V.A., Altunin K.V., Lvov M.V. et al. Problems of aircraft engine lubrication systems. *Teplovye protsessy v tekhnike* [Thermal Processes in Engineering], 2021, vol. 13, no. 8, pp. 357–384, doi: <https://doi.org/10.34759/tpt-2021-13-8-357-384> (in Russ.).
- [15] Altunin V.A. [Analysis of thermal processes in liquid hydrocarbon fuels and refrigerants aircraft engines]. *46 Akademicheskije chteniya po kosmonavtike*. T. 1 [46th Academic Readings on Cosmonautics. Vol. 1]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2022, pp. 428–430. (In Russ.).
- [16] Altunin V.A., Lvov M.V., Kaskov A.S. et al. [Recording problems in aircraft engines lubricating systems]. *Sovremennye problemy raketnoy i kosmicheskoy tekhniki. Sb. nauch. st. 56 nauchnykh chteniy pamyati K.E. Tsiolkovskogo* [Modern Problems of Rocket and Space Technology. Proc. 56th Scientific Readings in Memory of K.E. Tsiolkovsky.]. Kazan, Shkola Publ., 2022, pp. 99–113. (In Russ.).

- [17] Altunin K.V. *Funktsionalno-stoimostnoy analiz gorelochnykh ustroystv i forsunok* [Functional cost analysis of burner devices and nozzles]. Kazan, Izd-vo KNITU-KAI Publ., 2020. 154 p. (In Russ.).
- [18] Altunin V.A., Lvov M.V., Shchigolev A.A. et al. Calculation of the density of motor aviation MS-20 brand oils at various temperature and pressure. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2023, no. 2, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2023-2-2252> (in Russ.).
- [19] Altunin V.A., Lvov M.V., Yusupov A.A. et al. Results of experimental study of the thermal processes at forced convection of the MS-20 engine aviation oil. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2023, no. 6, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2023-6-2285> (in Russ.).
- [20] Altunin V.A., Lvov M.V., Yusupov A.A. et al. 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. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2023, no. 11. EDN: IPBMWS (in Russ.).
- [21] Altunin V.A., Lvov M.V., Yusupov A.A. et al. 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. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2023, no. 12. EDN: HLESWT (in Russ.).
- [22] Altunin V.A., Lvov M., Yusupov A.A. et al. Methods for computing the electrostatic fields influence on heat transfer to the MS-20 aviation motor oil exposed to its forced convection. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2024, no. 7. EDN: KVVODU (in Russ.).
- [23] Altunin V.A. *Vliyanie kriticheskikh davleniy na teplovye protsessy v zhidkikh uglevodorodnykh goryuchikh i okhladitelyakh* [Influence of critical pressures on thermal processes in liquid hydrocarbon fuels and coolants]. Kazan, Shkola Publ., 2020. 209 p. (In Russ.).
- [24] Altunin V.A. *Svoystva i negativnost osadkoobrazovaniya v dvigatelyakh i energoustanovkakh na zhidkikh uglevodorodnykh goryuchikh i okhladitelyakh* [Properties and negativity of sedimentation in engines and power units on liquid hydrocarbon fuels and coolants]. Kazan, Shkola Publ., 2020. 129 p. (In Russ.).
- [25] Altunin V.A. *Termoakusticheskie avtokolebaniya davleniya v kanalakh dvigateley i energoustanovok* [Thermoacoustic autoconvulsions of pressure in the channels of engines and power units]. Kazan, Shkola Publ., 2020. 171 p. (In Russ.).
- [26] Altunin K.V. Development of a method for calculating the temperature of a fuel sprayer inner wall with the goal of preventing the deposit formation. *Vestnik KGTU im. A.N. Tupoleva*, 2020, no. 4, pp. 32–38. (In Russ.).
- [27] Altunin K.V. Elaborating new specific parameters of a jet engine. *Vestnik MAI* [Aerospace MAI Journal], 2020, vol. 27, no. 3, pp. 146–154, doi: <https://doi.org/10.34759/vst-2020-3-146-154> (in Russ.).
- [28] Altunin K.V. R Elaboration of a criterion heat transfer equation of electrostatic fields influence in kerosene medium at free convection and deposit formation. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2021, no. 1, doi: <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2021-1-2049> (in Russ.).
- [29] Altunin K.V. Development of a chemical simplex of deposit formation on the walls of the fuel supply channels of engines and power plants. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2021, no. 9, doi: <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2021-9-2110> (in Russ.).
- [30] Altunin K.V. Elaboration of a new calculation procedure of hydrocarbon deposit layer thickness in fuel channels of heat engines and power plants. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2021, no. 10, doi: <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2021-10-2119> (in Russ.).
- [31] Altunin K.V. Research of electrostatic fields influence on heat transfer at free convection of kerosene. *Teplovye protsessy v tekhnike* [Thermal Processes in Engineering], 2020, vol. 12, no. 9, pp. 403–410, doi: <https://doi.org/10.34759/tpt-2020-12-8-403-410> (in Russ.).
- [32] Altunin K.V. Development of calculation methods of heat transfer under influence of deposit formation and electric convection in a medium of kerosene. *Teplovye protsessy v*

- tehnike* [Thermal Processes in Engineering], 2022, vol. 14, no. 7, pp. 325–334, doi: <https://doi.org/10.34759/tpt-2022-14-7-325-334> (in Russ.).
- [33] Altunin K.V. Elaboration of a criterion equation for forced kerosene motion with a new electric convection number. *Vestnik KGTU im. A.N. Tupoleva*, 2020, no. 3, pp. 30–33. (In Russ.).
- [34] Altunin K.V. Elaboration of electric convection similarity criterions. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki* [Power Engineering: Research, Equipment, Technology], 2012, no. 1-2, pp. 168–171. (In Russ.).
- [35] Altunin V.A., Altunin K.V., Abdullin M.R. et al. Some ways to improve engines and energy plants brand "NK". Part I. *Teplovy protsessy v tekhnike* [Thermal Processes in Engineering], 2021, vol. 13, no. 12, pp. 530–542, doi: <https://doi.org/10.34759/tpt-2021-13-12-530-542> (in Russ.).
- [36] Altunin V.A., Altunin K.V., Abdullin M.R. et al. [some ways to improve engines and power plants of the "NK" brand on liquid and gaseous hydrocarbon fuels]. *Aviatsiya i kosmonavtika. Tez. dok. 20-y Mezhd. konf.* [Aviation and Cosmonautics. Abs. 20th Int. Conf.]. Moscow, Pero Publ., 2021, pp. 86–88. (In Russ.).
- [37] Altunin V.A., Altunin K.V., Abdullin M.R. et al. Certain ways to the "NK" brand engines and power plants improvement. Part 2. *Teplovy protsessy v tekhnike* [Thermal Processes in Engineering], 2022, vol. 14, no. 1, pp. 9–21, doi: <https://doi.org/10.34759/tpt-2022-14-1-9-21> (in Russ.).
- [38] Lvov M.V., Yusupov A.A., Altunin V.A. [Results of experimental study of thermal processes in aviation engine oils under natural and forced convection]. *17 Korolevskie chteniya*. T. 1 [17th Korolev Readings. Vol. 1]. Samara. Izd-vo Samarskogo universiteta Publ., 2023, pp. 203–204. (In Russ.).
- [39] Altunin V.A., Platonov E.N., Abdullin M.R. et al. [Some ways to improve liquid missile engines (100th anniversary of birth academician V.E. Alemasov - dedicated)]. *Idei Tsiolkovskogo v teoriyakh osvoeniya kosmosa. Mat. 58-kh Nauchnykh chteniy*. Ch. 1 [Tsiolkovsky's Ideas in Theories of Space Exploration. Proc. 58th Academic Readings. P. 1]. Kaluga, Nasha poligrafiya Publ., 2023, pp. 201–205. (In Russ.).
- [40] Altunin V.A., Lvov M.V., Yusupov A.A. et al. [Results of experimental study of thermal processes in the lubrication systems of aircraft engines]. *Grazhdanskaya aviatsiya na sovremennom etape razvitiya nauki, tekhniki i obshchestva. Sb. tez. dok. Mezhd. nauch.-tekh. konf.* [Civil Aviation at Present Development Stage of Science, Technology and Society. Abs. Int. Sci.-Tech. Conf.]. Moscow, ID Akademii imeni N.E. Zhukovskogo Publ., 2023, pp. 51–52. (In Russ.).
- [41] Lvov M.V., Altunin V.A. [Development of the experimental installation for studying the influence of electrostatic fields on thermal processes in motor aviation oils under forced convection]. *46 Akademicheskie chteniya po kosmonavtike*. T. 1 [46th Academic Readings on Cosmonautics. Vol. 1]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2022, pp. 458–460. (In Russ.).
- [42] Altunin V.A., Lvov M.V., Shchigolev A.A. et al. [Experimental study of thermal processes under forced convection of aircraft motor oils]. V: *Sovremennye problemy raketnoy i kosmicheskoy tekhniki* [Modern Problems of Rocket and Space Technics]. Kazan, Shkola Publ., 2023, pp. 204–218. (In Russ.).
- [43] Altunin V.A., Platonov E.N., Abdullin M.R. et al. [Problems of creation of reusable liquid rocket engines]. *K.E. Tsiolkovskiy: klyuchevye idei i sovremennye dostizheniya kosmonavtiki. Mat. 59-kh Nauchnykh chteniy*. Ch. 1 [K.E. Tsiolkovskiy: Key Ideas and Modern Achievements of Cosmonautics. P. 1]. Kaluga, Eydos Publ., 2024, pp. 178–182. (In Russ.).
- [44] Altunin V.A., Yusupov A.A., Lvov M.V. et al. [Creation of an experimental setup for studying the influence of electrostatic fields on thermal and hydraulic processes in fuel and oil filters of engines of aircraft of air, aerospace and space based]. *Sb. mat. 2-go Vseros. nauch.-tekh. foruma po dvigatelyam i energeticheskim ustanovkam imeni N.D. Kuznetsova* [Proc. 2nd N.D. Kuznetsov Russ. Sci.-Tech. Forum on Engines and Power Plants]. Samara, Izd-vo Samarskogo un-ta Publ., 2024, pp. 170–172. (In Russ.).
- [45] Bologa M.K., Baboy N.F. Influence of an electric field on heat exchange at boiling of organic liquids. *Elektronnaya obrabotka materialov*, 1967, no. 3, pp. 30–40. (In Russ.).

- [46] Baboy R.F., Bologa M.K. Some features of boiling process in an electric field. *Elektronnaya obrabotka materialov*, 1968, no. 2, pp. 57–70. (In Russ.).
- [47] Baboy R.F., Bologa M.K. Teploobmen pri kipenii organicheskikh zhidkostey v elektricheskoy pole [Heat transfer during boiling of organic liquids in an electric field]. V: *Teplo i massopereenos*. T. 2 [In: Heat and mass transfer. Vol. 2]. Minsk, 1968, pp. 197–204. (In Russ.).
- [48] Bologa M.K., Grosu F.P., Kozhukhar I.A. *Elektrokonvektsiya i teploobmen* [Electroconvection and heat exchange.]. Kishinev, Shtiintsa Publ., 1977. 320 p. (In Russ.).
- [49] Zhakin A.I. Investigation of electroconvection and electroconvective heat transfer in liquid dielectrics with unipolar injection conductivity. *Izvestiya AN SSSR. Mekhanika zhidkosti i gaza*, 1988, no. 2, pp. 14–20. (In Russ.). (Eng. version: *Fluid Dyn.*, 1988, vol. 23, no. 2, pp. 168–174, doi: <https://doi.org/10.1007/BF01051883>)
- [50] Stishkov Yu.K., Buyanov A.V., Lazarev A.S. Simulation of the electrohydrodynamic flow pattern in an asymmetric system of electrodes. *ZhTF*, 2005, vol. 75, no. 5, pp. 46–51. (In Russ.). (Eng. version: *Tech. Phys.*, vol. 50, no. 5, pp. 576–581, doi: <https://doi.org/10.1134/1.1927211>)
- [51] Stishkov Yu.K., Krasilnikov S.Yu., Chirkov V.A. Investigation of electrohydrodynamic flows in superstrong electric fields. *Elektronnaya obrabotka materialov*, 2012, no. 48, pp. 26–32. (In Russ.). (Eng. version: *Surf. Engin. Appl. Electrochem.*, 2012, vol. 48, no. 4, pp. 312–317, doi: <https://doi.org/10.3103/S1068375512040163>)
- [52] Grosu F.P., Bologa M.K. Peculiarities of electrification of a weakly conducting dielectric liquid in an external electric field. *Elektronnaya obrabotka materialov*, 2006, no. 4, pp. 37–45. (In Russ.).
- [53] Bologa M.K., Kozhevnikov I.V., Mardarskiy O.I. et al. Boiling heat transfer in the field of electric forces. *Elektronnaya obrabotka materialov*, 2012, no. 4, pp. 44–46. (In Russ.). (Eng. version: *Surf. Engin. Appl. Electrochem.*, 2012, vol. 48, no. 4, pp. 329–331, doi: <https://doi.org/10.3103/S1068375512040047>)
- [54] Grosu F.P., Bologa M.K. Electroisothermal convection and its role in the process of heat exchange. *Elektronnaya obrabotka materialov*, 2008, no. 3, pp. 25–35. (In Russ.). (Eng. version: *Surf. Engin. Appl. Electrochem.*, 2008, vol. 44, no. 3, pp. 187–194, doi: <https://doi.org/10.3103/S1068375508030046>)
- [55] Mardarskiy O.I., Bologa M.K. On the mechanism of heat transfer enhancement at boiling in an electric field. *Elektronnaya obrabotka materialov*, 2009, no. 3, pp. 42–48. (In Russ.). (Eng. version: *Surf. Engin. Appl. Electrochem.*, 2009, vol. 45, no. 3, pp. 206–211, doi: <https://doi.org/10.3103/S1068375509030065>)
- [56] Mirolyubov N.N., Kostenko M.V., Levinshcheyn M.L. et al. *Metody rascheta elektrostati-cheskikh poley* [Calculation methods for electrostatic fields]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1963. 416 p. (In Russ.).
- [57] Ostroumov G.A. *Vzaimodeystvie elektricheskikh i gidrodinamicheskikh poley* [Interaction of electric and hydrodynamic fields]. Moscow, Nauka Publ., 1979. 320 p. (In Russ.).
- [58] Vereshchagin I.P., Levitov V.I., Mirzabekyan G.Z. et al. *Osnovy elektrogazodinamiki dispersnykh system* [Fundamentals of electrogasodynamics of disperse systems]. Moscow, Energiya Publ., 1974. 480 p. (In Russ.).
- [59] Petrichenko H.A. Thermal phenomena accompanying electric wind in liquids. *Elektronnaya obrabotka materialov*. 1973, no. 6, pp. 44–45. (In Russ.).
- [60] Savinykh B.V., Gumerov F.M. *Svoystva perenosy dielektricheskikh zhidkostey i teplo-massoobmen v elektricheskikh polyakh* [Transfer properties of dielectric liquids and heat and mass transfer in electric fields]. Kazan, Fen Publ., 2002. 384 p. (In Russ.).
- [61] Semenov K.N., Bologa M.K., Vidrashko V.K. Influence of electric field on convective heat transfer in a nonpolar liquid. *Elektronnaya obrabotka materialov*, 1966, no. 2, pp. 48–52. (In Russ.).
- [62] Kozhevnikov I.V., Bologa M.K. Influence of electrohydrodynamic flows on intensification of heat- and mass-transfer processes: Part 1. Electrohydrodynamic flows and characteristics of single-stage electrohydrodynamic pumps. *Elektronnaya obrabotka materialov*, 2022, vol. 58, no. 1, pp. 58–78, doi: <https://doi.org/10.52577/eom.2022.58.1.58> (in Russ.). (Eng. version: *Surf. Engin. Appl. Electrochem.*, 2022, vol. 58, no. 4, pp. 350–368, doi: <https://doi.org/10.3103/S1068375522040093>)

- [63] Kozhevnikov I.V., Bologa M.K., Grosu F.P. Influence of electrohydrodynamic flows on intensification of heat- and mass-transfer processes: Part 3. electroconvection and electrohydrodynamic pumps in the cooling and thermostating systems. *Elektronnaya obrabotka materialov*, 2022, vol. 58, no. 3, pp. 34–54, doi: <https://doi.org/10.52577/eom.2022.58.3.34> (in Russ.). (Eng. version: *Surf. Engin. Appl. Electrochem.*, 2023, vol. 59, no. 1, pp. 59–78, doi: <https://doi.org/10.3103/S106837552301009X>)
- [64] Fedonenko A.I., Zhakin A.I. Experimental studies of electroconvective motion in transformer oil. *Magnitnaya gidrodinamika*, 1982, no. 3, pp. 74–78. (In Russ.).
- [65] Apfelbaum M.S., Yantovskiy E.I. About the force acting from a needle electrode on a weakly conducting liquid dielectric and the currents caused by it. *Magnitnaya gidrodinamika*, 1977, no. 4, pp. 73–80. (In Russ.).
- [66] Kronig R., Schwarz N. On the theory of heat transfer from a wire in an electric field. *Appl. Sci. Res.*, 1949, vol. 1, pp. 35–54, doi: <https://doi.org/10.1007/BF02120314>
- [67] Senftleben E., Braun W. Der Einfluß elektrischer Felder auf den Wärmestrom in Gasen. *Z. Physik*, 1936, vol. 102, no. 7-8, pp. 480–506, doi: <https://doi.org/10.1007/BF01337819>
- [68] Atten P., Lacroix J.S. Non-linear stability of liquids subjected to unipolar injection. *Journal de Mecanique*, 1979, vol. 18, no. 3, pp. 469–510.
- [69] Worraker W.J., Richardson A.T. The effect of temperature — induced variations in charge carrier mobility on a stationary electrohydrodynamic instability. *J. Fluid Mech.*, 1979, vol. 93, no. 1, pp. 29–45, doi: <https://doi.org/10.1017/S0022112079001762>
- [70] Castellanos A., Atten P., Velarde M.G. Oscillatory and steady convection in dielectric liquid layers subjected to unipolar injection and temperature gradient. *Phys. Fluids*, 1984, vol. 27, no. 7, pp. 1607–1615, doi: <https://doi.org/10.1063/1.864816>
- [71] Pontiga F., Castellanos A., Richardson A.T. The onset of overstable motions in a layer of dielectric liquid subjected to the simultaneous action of a weak unipolar injection of charge and a thermal gradient. *Q. J. Mech. Appl. Math.*, 1992, vol. 45, no. 1, pp. 25–46, doi: <https://doi.org/10.1093/qjmam/45.1.25>
- [72] Koulova-Nenova D., Slavtchev S. Numerical study of electrohydrodynamic stability of dielectric liquid layers subjected to unipolar injection. *Mater. Sci.*, 1990, vol. 16, no. 4, pp. 53–59.
- [73] Koulova-Nenova D., Slavtchev S. Electrohydrodynamic stability of two dielectric liquid layers at unipolar injection. *Electrostatics*, 1991, Inst. Phys. Conf. Ser. No 118, IOP Publishing LTD, Bristol, 1991, pp. 317–322.
- [74] Chang J.S., Kelly A.J., Crowley J.M. *Handbook of electrostatic processes*. CRC Press, 2018.
- [75] Kelly A. The electrostatic atomization of hydrocarbons. *ICLASS-82*, 1982, pp. 57–65.
- [76] Iranshahi K., Defraeye T., Rossi R.M. et al. Electrohydrodynamics and its applications: Recent advances and future perspectives. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 2024, vol. 232, no. 5, art. 125895, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125895>
- [77] Shchukin V.K., ed. *Teoriya i tekhnika teplofizicheskogo eksperimenta* [Theory and technique of thermophysical experiment]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1985. 360 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 01.04.2025

Информация об авторах

АЛТУНИН Виталий Алексеевич — доктор технических наук, академик Российской академии космонавтики им. К.Э. Циолковского (РАКЦ), президент Казанского регионального отделения РАКЦ, Заслуженный изобретатель Республики Татарстан, профессор кафедры «Теплотехника и энергетическое машиностроение». Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ (420111, Казань, Российская Федерация, ул. К. Маркса, д. 10, e-mail: altspacevi@yahoo.com).

АЛТУНИН Константин Витальевич — доктор технических наук, доцент кафедры «Теплотехника и энергетическое машиностроение». Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ (420111, Казань, Российская Федерация, ул. К. Маркса, д. 10, e-mail: altkonst881@yandex.ru).

ЮСУПОВ Артур Альбертович — аспирант кафедры «Теплотехника и энергетическое машиностроение». Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ (420111, Казань, Российская Федерация, ул. К. Маркса, д. 10, e-mail: Ar_yusupov@mail.ru).

ЛЬВОВ Михаил Валерьевич — аспирант кафедры «Теплотехника и энергетическое машиностроение». Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ (420111, Казань, Российская Федерация, ул. К. Маркса, д. 10, e-mail: miha.lev@mail.ru).

ЩИГОЛЕВ Александр Александрович — докторант кафедры «Теплотехника и энергетическое машиностроение». Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ (420111, Казань, Российская Федерация, ул. К. Маркса, д. 10, e-mail: elshhigoleva@yandex.ru).

ГОРТЫШОВ Юрий Федорович — доктор технических наук, Заслуженный деятель науки РФ, Заслуженный деятель науки и техники Республики Татарстан, академик Академии наук Республики Татарстан, академик Российской академии естественных наук, академик Международной инженерной академии, академик Академии авиации и воздухоплавания им. Н.Е. Жуковского, академик Академии военных наук, Почетный член РАКЦ, Лауреат Премии Правительства РФ в области образования, Лауреат Государственной научной стипендии выдающимся ученым России, Заслуженный профессор, профессор, помощник ректора. Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева — КАИ (420111, Казань, Российская Федерация, ул. К. Маркса, д. 10, e-mail: jurij.gortyshov@kai.ru).

Information about the authors

ALTUNIN Vitaly Alekseevich — Doctor of Science (Eng.), Academician of the Russian Academy of Cosmonautics named after K.E. Tsiolkovsky (RACTs); President of the Kazan Regional Branch of the RACTS; Honored Inventor of the Republic of Tatarstan; Professor, Department of Thermal Engineering 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 — Doctor of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Thermal Engineering 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: altkonst881@yandex.ru).

YUSUPOV Artur Albertovich — Postgraduate, Department of Thermal Engineering 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: Ar_yusupov@mail.ru).

LVOV Mikhail Valerievich — Postgraduate, Department of Thermal Engineering 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: miha.lev@mail.ru).

SHCHIGOLEV Alexander Alexandrovich — Doctoral Candidate, Department of Thermal Engineering 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: elshhigoleva@yandex.ru).

GORTYSHOV Yuri Fedorovich — Doctor of Science (Eng.), Honored Scientist of the Russian Federation, Honored Scientist and Engineer of the Republic of Tatarstan, Academician of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, Academician of the International Engineering Academy, Academician of the Academy of Aviation and Aeronautics named after N.E. Zhukovsky, Academician of the Academy of Military Sciences, Honorary Member of the Russian Academy of Cosmonautics named after K.E. Tsiolkovsky, Laureate of the Russian Government Prize in the field of education, Laureate of the State Scientific Scholarship for Outstanding Scientists of Russia, Honored Professor, Professor, Assistant to the Rector. Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI (420111, Kazan, Russian Federation, K. Marx St., Bldg. 10, e-mail: jurij.gortyshov@kai.ru).

ЯНОВСКАЯ Мария Леонидовна — кандидат технических наук, младший научный сотрудник. Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова (111116, Москва, Российская Федерация, Авиамоторная, д. 2, e-mail: maria-yanovskaya-ww@yandex.ru).

YANOVSKAYA Maria Leonidovna — Candidate of Science (Eng.), Junior Researcher. Central Institute of Aviation Motors (111116, Moscow, Russian Federation, Aviamotornaya St., Bldg. 2, e-mail: maria-yanovskaya-ww@yandex.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Алтунин В.А., Алтунин К.В., Юсупов А.А., Львов М.В., ЩигOLEV А.А., Гортышов Ю.Ф., Яновская М.Л. Разработка экспериментальной установки для исследования особенностей влияния электростатических полей на тепловые и гидравлические процессы в жидких углеводородных горючих и моторных авиационных маслах двигателей летательных аппаратов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 10, с. 95–115.

Please cite this article in English as:

Altunin V.A., Altunin K.V., Yusupov A.A., Lvov M.V., Shchigolev A.A., Gortyshov Yu.F., Yanovskaya M.L. Development of an experimental setup to study features of the electrostatic fields influence on thermal and hydraulic processes in the liquid hydrocarbon fuel and aviation motor oils of the aircraft engines. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 10, pp. 95–115.



**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает читателям учебное пособие
«Нанохимия. Введение в нанохимию
и технологию наноматериалов»**

**Авторы: Т.И. Шабатина, С.Л. Березина, Ю.Н. Морозов,
В.В. Федоров**

Нанохимия — быстроразвивающаяся область фундаментальной и прикладной науки, направленная на разработку физико-химических подходов и методов получения частиц вещества размером несколько нанометров и их упорядоченных ансамблей. Результаты нанохимии открывают перспективы для синтеза наночастиц химических веществ и наноструктурированных материалов с принципиально новыми физико-химическими и функциональными свойствами и создания нанотехнологий на их основе.

Приведено описание углеродных наноматериалов, нанокomпозитов, нанопорошковых и нанопористых материалов, квантово-размерных наноструктур и фотонных кристаллов, метаматериалов, а также супрамолекулярных наноструктур и молекулярных нанотехнологий. Рассмотрены экологические и социальные аспекты применения инновационных нанотехнологий и наноматериалов.

Для студентов и магистрантов, специализирующихся в области материаловедения, химической технологии, машиностроительных и приборостроительных специальностей.

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; <https://press.bmstu.ru>