

Разработка критериального уравнения влияния электростатических полей на теплообмен и осадкообразование в среде керосина при естественной конвекции

© К.В. Алтунин

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева — КАИ, Казань, 420111, Россия

Рассмотрена проблема осадкообразования в двигателях и энергоустановках, работающих на жидких углеводородных горючих и охладителях. Выполнен анализ процесса появления углеродсодержащих осадков при нагреве металлических стенок каналов топливных систем двигателей. Создана экспериментальная установка для исследования влияния электростатических полей на интенсификацию теплоотдачи в жидком авиационном керосине марки ТС-1 и процесс осадкообразования на нагреваемой рабочей пластине. Проведена визуализация воздействия электрического ветра на тепловые процессы с помощью оптической установки Теплера. Изучено влияние электростатических полей на процессы теплообмена и осадкообразования в среде керосина при использовании в качестве электродов соосных игл. На основе результатов исследований сделано обобщение в виде нового критериального уравнения, содержащего число подобия электроконвекции и симплекс осадкообразования.

Ключевые слова: керосин, естественная конвекция, электростатические поля, электроконвекция, число подобия, осадкообразование

Введение. Применение электростатических полей для интенсификации теплоотдачи в жидкостях и газах (включая воздух) известно давно [1–25]. Электрической конвекцией (или электрическим ветром) принято называть макроскопическое движение жидкостей и газов под воздействием внешнего электростатического поля. Источником электроконвекции является неоднородность среды по электрическим параметрам (диэлектрическая проницаемость, электрическая проводимость, плотность объемных зарядов) [1–16]. Наибольший эффект электрического ветра дает система электродов типа «игла — игла» [1–6, 14]. Под влиянием электрического ветра коэффициент теплоотдачи в жидкостях и газах может увеличиваться при их естественной конвекции в несколько раз [1–4, 13–16]. Однако исследований влияния электростатических полей на тепловые процессы в жидких углеводородных горючих и охладителях (УВГ и УВО) при их естественной конвекции очень мало [1, 2, 14, 17–25]. При температуре до 40 °С (313 К) жидкие УВГ и УВО являются диэлектриками. При повышении температуры более 40 °С (313 К) эти вещества становятся электропроводными средами, так как в них появляются положительно и отрицательно заряженные частицы. При нагреве жидких УВГ и УВО

до температуры более 100 °С (373 К) в них образуются диполи, которые активно участвуют в процессе осадкообразования [1, 2, 18–25].

Осадкообразование — один из аномальных негативных и опасных тепловых процессов в двигателях и энергоустановках (ЭУ), работающих на жидких УВГ и УВО. Проблема осадкообразования существует и в наземном транспорте, и в теплоэнергетике, и в ракетостроении, и в авиации. Вследствие образования осадка значительно сокращается ресурс и снижается надежность двигателей и ЭУ наземного, воздушного, аэрокосмического и космического базирования и применения, возникают аварийные ситуации, связанные с внезапным и несанкционированным преждевременным выходом их из строя [1, 2, 14, 17–29]. Например, из 205 летных происшествий в год в ВВС США 38 % вызвано неполадками в топливной системе самолетов, в том числе вследствие осадкообразования. Возникают по этой причине и экономические проблемы. Например, на борьбу с образованием углеродсодержащих отложений в промышленности США ежегодно выделяется около 10 млрд долларов; только для обычного нефтеперерабатывающего завода ежегодные затраты на эти цели достигают 10 млн долларов [26].

В газотурбинных и воздушно-реактивных двигателях (ВРД), в других ЭУ и техносистемах одно- и многократного использования различного назначения, базирования и применения негативный процесс осадкообразования способствует частичному и полному закоксовыванию топливных каналов, фильтров и форсунок. Частичное закоксовывание только одной форсунки ВРД приводит к нерасчетному струйному распылу с дальнейшим прогаром жаровой трубы, пожаром и взрывом, а при частичном закоксовывании нескольких форсунок — к частичной потере тяги. В случае полного закоксовывания (примерно через 900 циклов работы двигателя) ведет к полной потере тяги, образованию течи в системе топливоподдачи, пожару и взрыву. Кроме того, твердый углеродистый осадок на деталях системы управления двигателем летательного аппарата (ЛА) приводит к их заеданию и заклиниванию с дальнейшей неуправляемостью и разносом двигателя, т. е. к возникновению аварийных ситуаций.

Через 1...3 мин после запуска жидкостного ракетного двигателя (ЖРД) и ЖРД многократного использования (ЖРДМИ) внутренние стенки каналов рубашки охлаждения покрываются слоем твердого углеродистого осадка толщиной δ_{oc} , вследствие чего происходит внезапный, несанкционированный и быстрый нагрев стенок рубашек охлаждения с дальнейшим их перегревом, прогаром и взрывом. Кроме того, частичное закоксовывание топливно-охлаждающих каналов и форсунок ЖРДМИ приводит к частичной потере тяги, к необходимости увеличения времени работы и числа пусков ЖРДМИ (для достижения необходимого импульса тяги и выполнения запланирован-

ного либо внепланового маневра космического ЛА или космической станции на орбите), что влечет за собой увеличение расхода бортовых запасов УВГ (УВО) и окислителя. Полное закоксовывание приводит к полной потере тяги, к аварийным ситуациям, связанным с образованием течи УВГ (УВО), к пожарам и взрывам, а также к невыполнению полетных заданий.

Необходимо вести всестороннюю борьбу с осадкообразованием уже на ранней стадии проектирования двигателей и ЭУ на жидких УВГ и УВО. Автором работы [2] проведена полная классификация способов и методов борьбы с этим негативным явлением, в которых для предотвращения образования, уменьшения и ограничения роста углеродистого осадка используют электростатические поля.

Предложены различные формулы для расчета теплоотдачи в жидкостях и газах при использовании электростатических полей, созданы критерии подобия, связанные с влиянием электрического ветра, но многие из них, в том числе формулы и критерии для жидких УВГ и УВО [8, 12, 13, 15, 16], неработоспособны или неточны.

Известна формула, описывающая влияние электростатических полей на процесс осадкообразования в жидких УВГ и УВО [2], однако отсутствуют формулы совместного и одновременного учета теплоотдачи и осадкообразования в условиях естественной и вынужденной конвекции жидких УВГ и УВО при влиянии электростатических полей. В данной работе исследуется влияние электростатических полей на тепловые процессы в условиях естественной конвекции жидких УВГ и УВО.

Цель настоящей работы — на основе экспериментальных данных провести обобщение и вывести критериальное уравнение теплоотдачи при одновременном влиянии электростатических полей и осадкообразования на теплоотдачу и в условиях естественной конвекции жидких УВГ и УВО.

Результаты экспериментальных исследований при естественной и электрической конвекции. Для достижения поставленной цели была создана экспериментальная установка, проведены исследования влияния электростатических полей на интенсификацию теплоотдачи в жидком УВГ и УВО (авиационный керосин марки ТС-1) и осадкообразование на нагреваемой рабочей пластине.

Установка для проведения исследований представляет собой заполненную керосином марки ТС-1 экспериментальную бомбу, в которой создавалось рабочее давление. В бомбу вставляли рабочую пластину из нержавеющей стали, которая нагревалась джоулевой теплотой. Над пластиной и под ней размещали рабочие элементы — электроды в виде одной пары (или двух и трех пар) соосных рабочих игл, на которые подавали высоковольтное электростатическое

напряжение. Расстояние между остриями рабочих соосных игл устанавливали равным 5, 10 и 15 мм. Расстояние между соседними парами соосных рабочих игл изменяли от 5 до 20 мм, исследуя таким образом возможность увеличения площади участка рабочей пластины, на котором не происходит осадкообразования. Для создания и регулирования электростатического напряжения в пределах 0...50 кВ использовали прибор марки АФ-3. Тепловые процессы фиксировали на фотографиях через окна визуализации экспериментальной бомбы на установке Теплера. Электростатические поля включали одновременно с началом нагрева рабочей пластины.

В ходе экспериментальных исследований было установлено, что электрический ветер:

- полностью прекращает процесс кипения (паровые пузыри и тепловые свилы) на всей поверхности пластины при любом давлении в экспериментальной бомбе, увеличивая коэффициент теплоотдачи в керосине ТС-1 до 6,5 раза (при использовании одной пары соосных рабочих игл);

- способствует предотвращению осадкообразования на нагреваемой рабочей пластине только в зоне прохождения силовых линий электростатического поля;

- повышает интенсивность теплоотдачи и препятствует осадкообразованию только до границы зоны насыщения электростатическими полями; дальнейшее повышение подаваемого электростатического напряжения в зоне насыщения не приводит к ожидаемому увеличению коэффициента теплоотдачи и площади участка пластины без осадка, т. е. в зоне насыщения эти параметры остаются постоянными при любых значениях подаваемого напряжения.

На рис. 1, 2 приведены зависимости, отражающие влияние электростатических полей на интенсификацию теплоотдачи в керосине ТС-1 при различных рабочих параметрах.

Применение экспериментальной оптической установки Теплера позволило визуализировать динамику воздействия электрического ветра на тепловые процессы. Так, на рис. 3 зафиксирован начальный момент разрушения тепловых свилей на рабочей пластине под влиянием электрического ветра.

На рис. 4 отмечены две зоны. Одна из них — зона возможной интенсификации теплоотдачи и увеличения площади участка пластины без твердого углеродистого осадка путем повышения подаваемого электростатического напряжения на отдающую соосную иглу, другая — зона насыщения, в которой дальнейшее увеличение подаваемого электростатического напряжения не приводит к увеличению коэффициента теплоотдачи α_E и площади участка пластины без осадка, т. е. эти параметры в зоне насыщения остаются постоянными.

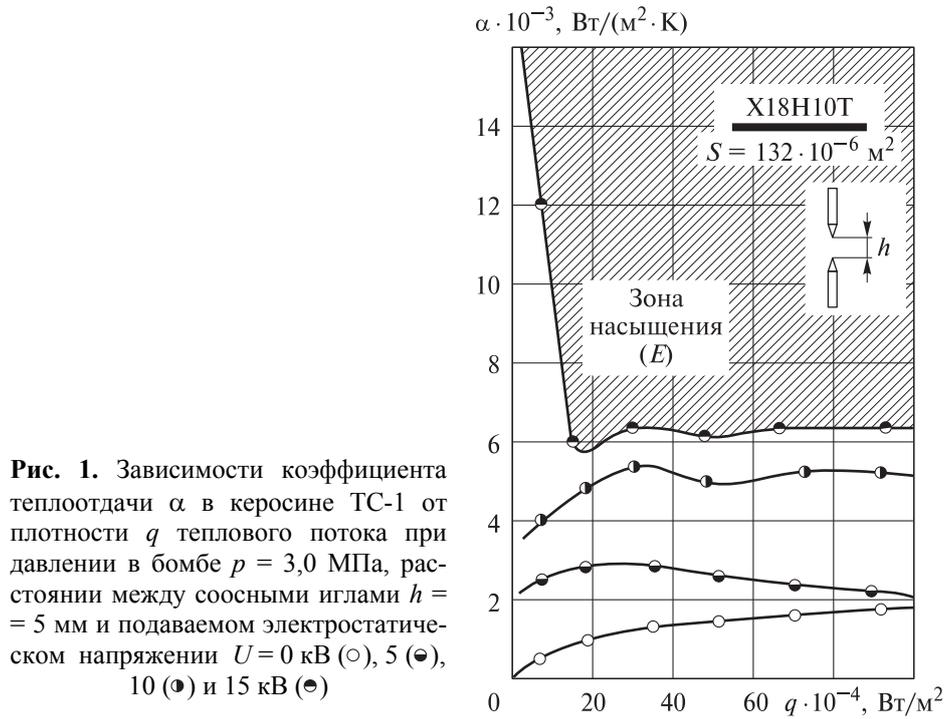


Рис. 1. Зависимости коэффициента теплоотдачи α в керосине ТС-1 от плотности q теплового потока при давлении в бомбе $p = 3,0$ МПа, расстоянии между соосными иглами $h = 5$ мм и подаваемом электростатическом напряжении $U = 0$ кВ (\circ), 5 (\ominus), 10 (\bullet) и 15 кВ (\odot)

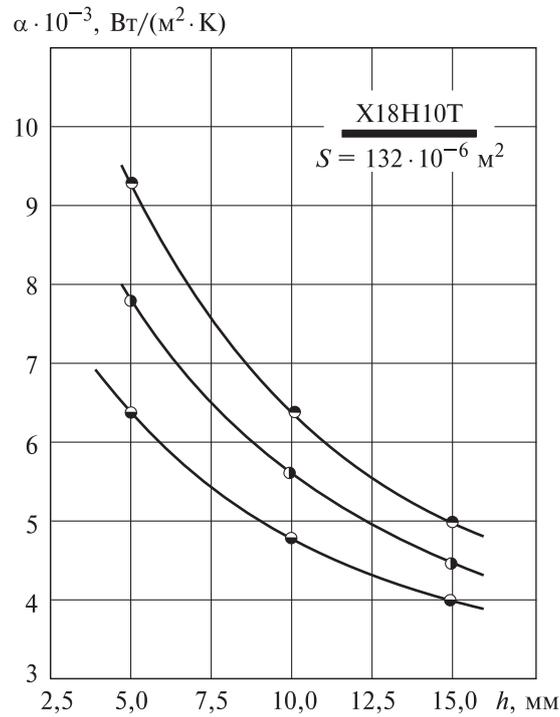


Рис. 2. Зависимости коэффициента теплоотдачи α в керосине ТС-1 от расстояния h между остриями рабочих соосных игл и числа их пар (\ominus , \bullet , \odot — одна, две, три пары соответственно) при давлении $p = 3,0$ МПа и плотности теплового потока $q = 80 \cdot 10^4$ Вт/м²

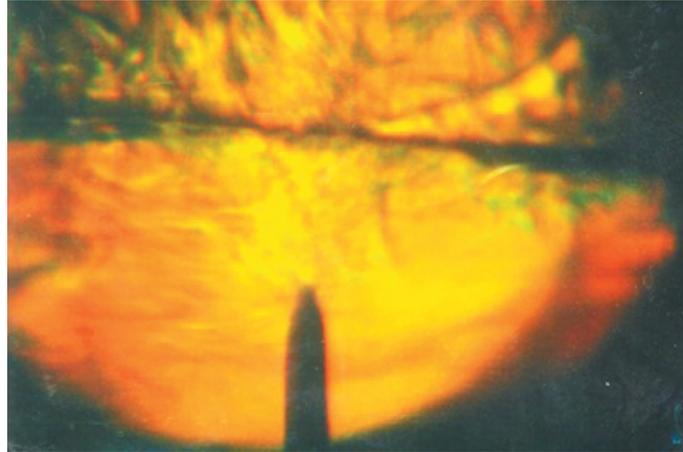


Рис. 3. Разрушение тепловых свилей на рабочей пластине в начале воздействия электрического ветра при $p = 3,0$ МПа $h = 10$ мм и $U = 5$ кВ

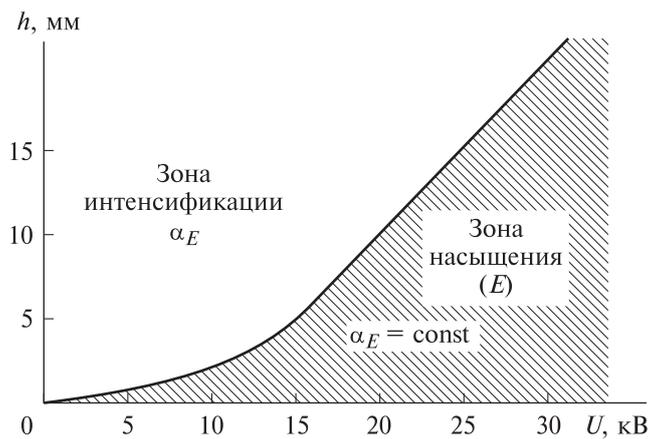


Рис. 4. Зона возможной интенсификации теплоотдачи в среде керосина ТС-1 и увеличения площади участка пластины (детали) без твердого углеродистого осадка и зона насыщения электростатическими полями (E)

Силовые линии электростатического поля, внутри которых на нагреваемой рабочей пластине предотвращается негативный процесс осадкообразования, приведены на рис. 5.

В реальных двигателях и ЭУ на жидких УВГ и УВО разного назначения и базирования можно предотвращать осадкообразование на различных нагреваемых деталях, таких как форсуночные фильтры, входные и выходные отверстия в корпусе форсунки и другие детали системы топливоподачи и охлаждения.

Для увеличения площади рабочей пластины, на которой предотвращено образование осадка, можно применять две, три пары соос-

ных рабочих игл и более. При этом необходимо подбирать расстояния между парами соосных игл и между их остриями, подаваемое электростатическое напряжение таким образом, чтобы внешние силовые линии от каждой пары соосных игл пересекались друг с другом, как показано, например, на рис. 6, а. Если внешние силовые линии не будут пересекаться, то между ними на нагреваемой рабочей пластине будет образовываться твердый углеродистый осадок.

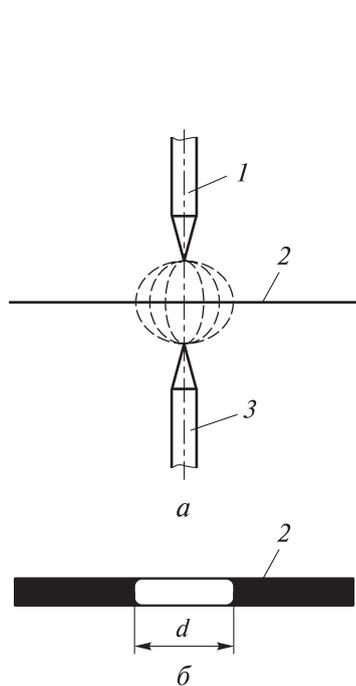


Рис. 5. Схема формирования силовых линий электростатического поля в среде керосина ТС-1 при системе электродов типа «игла — игла» (а) и пластина с рабочим участком без твердого углеродистого осадка в зоне прохождения силовых линий (б):

1, 3 — электроды; 2 — рабочая пластина; d — диаметр области без осадка

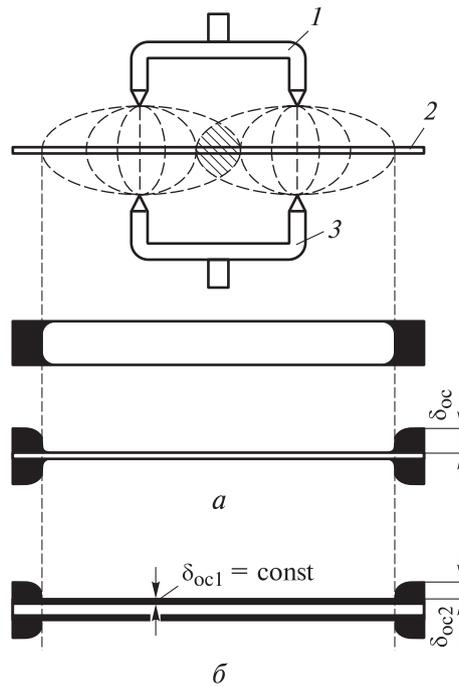


Рис. 6. Схема, отражающая влияние момента включения электростатических полей и пересекающихся внешних силовых линий на увеличение площади рабочей пластины без осадка в объеме керосина ТС-1:

а — одновременно с началом нагрева рабочей пластины (предотвращение осадкообразования); б — после нагрева рабочей пластины и образования слоя твердого углеродистого осадка (ограничение роста осадка); 1, 3 — электроды; 2 — рабочая пластина

Установлено, что для надежной защиты рабочей пластины от осадкообразования необходимо включать электростатические поля в постоянном режиме одновременно с началом нагрева пластины, т. е. с началом пуска двигателя или ЭУ, а выключать поля — после прекращения нагрева рабочей пластины и ее охлаждения до темпера-

туры 373 К и менее, т. е. после выключения двигателя или ЭУ и охлаждения пластины до этой температуры (см. рис. 6, а).

При включении электростатических полей после нагрева рабочей пластины, т. е. после пуска двигателя или ЭУ, на пластине через несколько минут работы уже будет образован слой твердого углеродистого осадка, а электростатические поля в этом случае будут способствовать затормаживанию дальнейшего роста осадка, т. е. его ограничению (рис. 6, б).

Для проверки результатов, полученных при исследовании влияния электростатических полей на процесс осадкообразования на нагреваемой рабочей пластине в среде жидких УВГ и УВО, и для подтверждения вывода о том, что осадок не образуется внутри силовых линий, были проведены дополнительные исследования, в которых вместо пластины нагревали мелкую металлическую сетку и применяли электроды разного типа. Установлено, что между системой электродов типа «игла — игла» силовые линии образуют объемное тело в виде веретена (или волчка), а система электродов типа «плоскость в виде треугольника — игла» образует объемное тело в форме треугольной пирамиды. Обнаружено, что нагреваемые сетки, расположенные между электродами, не имели углеродистого твердого осадка внутри объема силовых линий: в случае «веретена» или «волчка» — это круг, в случае «треугольной пирамиды» — это треугольник, что наглядно показано и описано в патенте на изобретение РФ [19].

Число подобия электроконвекции и симплекс осадкообразования. На основании результатов экспериментальных исследований и с помощью метода анализа размерностей автором данной статьи было получено число подобия электроконвекции в жидких УВГ и УВО [14]:

$$Al = \frac{U^2}{h\rho_e q}, \quad (1)$$

где U — напряжение тока (разность потенциалов на электродах), В; h — расстояние между электродами, м; ρ_e — удельное электрическое сопротивление рабочей среды (диэлектрика), Ом · м; q — плотность теплового потока, Вт/м².

Число подобия Al позволяет учитывать влияние электростатических полей на теплообмен в жидких углеводородных средах при изменении теплового потока от стенки и напряженности электростатического поля.

На основании анализа ранее опубликованных данных и результатов проведенных экспериментальных исследований автором данной статьи разработан безразмерный симплекс De осадкообразования:

$$De = \frac{T_w \lambda_f \delta_{oc} F_{oc}}{T_f \lambda_{oc} \delta_{oc \max} F_{oc \max}}, \quad (2)$$

где T_w — температура нагретой стенки, К; λ_f — теплопроводность УВГ (УВО), Вт/(м·К); δ_{oc} — толщина текущего слоя осадка, мм; F_{oc} — площадь детали (пластины, трубки), покрытая слоем осадка, мм²; T_f — температура УВГ (УВО), К; λ_{oc} — теплопроводность слоя осадка, Вт/(м·К); $\delta_{oc \max}$ — максимально возможная толщина слоя осадка, мм; $F_{oc \max}$ — максимально возможная площадь детали (пластины, трубки), которая может быть покрыта слоем осадка, мм².

Данный симплекс De позволяет создавать критериальные уравнения естественной и вынужденной конвекции жидких УВГ и УВО с учетом образования осадка на поверхностях нагретых стенок. В формулу (2) входят теплопроводность и объем слоя твердого углеродсодержащего осадка, температура стенки и жидкого УВГ (УВО), т. е. симплекс De отражает влияние процесса осадкообразования на теплообмен при воздействии различных факторов. Следует отметить, что в формуле (2) могут быть учтены также иные виды загрязнений поверхности теплообмена (например, слой накипи и т. п.).

Обобщение результатов экспериментальных исследований электроконвекции в среде керосина ТС-1 при осадкообразовании на нагреваемой рабочей пластине. Результаты исследования обобщены критериальным уравнением, содержащим число подобия электроконвекции Al и симплекс De , рассчитанные соответственно по формулам (1) и (2):

$$Nu_{E_{oc}} = c(RaAl)^{0,2} De^{-0,6}, \quad (3)$$

где $Nu_{E_{oc}}$ — число Нуссельта при электроконвекции и осадкообразовании; c — эмпирический коэффициент; Ra — число Рэлея.

При этом значения Ra , Al и De находились в следующих пределах: $4,3 \cdot 10^4 < Ra < 7,5 \cdot 10^7$; $1,58 \cdot 10^{-6} < Al < 290 \cdot 10^{-6}$; $0,045 < De < 0,09$. Значения коэффициента c приведены в таблице.

Значения коэффициента c в зависимости от электростатического напряжения U и расстояния h между соосными иглами при $p = 0,1 \dots 1,2$ МПа, $w = 0$, $q = 50 \dots 500$ кВт/м²

U , кВ	h , мм			Погрешность, %
	5	10	15	
5	1,84	3,86	3,48	±(4...29)
10	1,62	3,09	3,19	±(1...7)
15	1,44	2,94	3,09	±(1...18)
20	1,25	2,53	2,97	±(1...20)

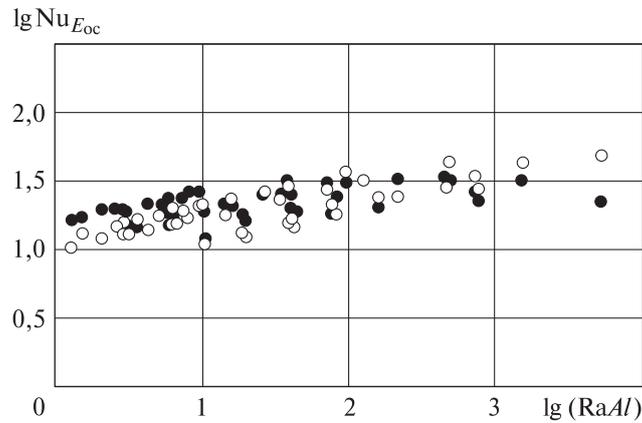


Рис. 7. Результаты экспериментальных (●) и теоретических (○) исследований влияния $RaAl$ на изменение $Nu_{E_{oc}}$ в логарифмических координатах при $p = 0,1 \dots 1,2$ МПа, $h = 5 \dots 15$ мм, $U = 5 \dots 20$ кВ, $w = 0$, $q = 50 \dots 700$ кВт/м²

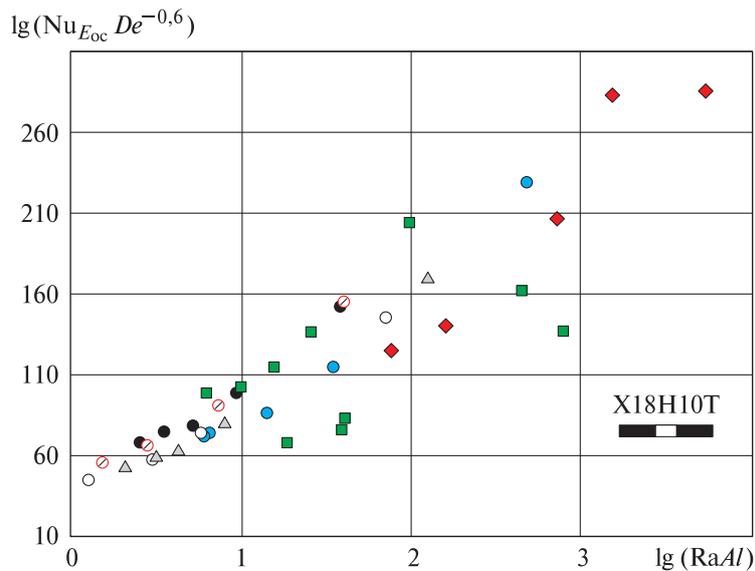


Рис. 8. Зависимость $Nu_{E_{oc}} De^{-0,6}$ от $RaAl$ в логарифмических координатах при напряженности электростатического поля $E = 0,3$ кВ/мм (○), $0,5$ (⊘), $0,7$ (Δ), $1,0$ (●), $1,3$ (◐), $2,0$ (■) и $4,0$ кВ/мм (◆)

Зависимость величины $\lg Nu_{E_{oc}}$ от величины $\lg (RaAl)$ представлена на рис. 7.

Критериальное уравнение (3) позволяет находить число Нуссельта Nu , а затем и коэффициент теплоотдачи α в условиях естественной конвекции углеводородного УВГ (УВО) одновременно при влиянии

электростатических полей и осадкообразования на нагретой стенке (с учетом эффекта предотвращения осадкообразования на пластине в зоне прохождения силовых линий электростатического поля).

С учетом наличия антистатической присадки начальная удельная электрическая проводимость керосина ТС-1 при 20 °С принята равной 171 пСм/м. В качестве определяющей температуры выбрана средняя температура T_{cp} керосина, а в качестве характерного размера — ширина s металлической пластинки: $s = 2$ мм. Уравнение (3) получено при использовании одной пары соосных игл-электродов.

На рис. 8 отражено влияние напряженности E электростатического поля на тепловые процессы в среде керосина ТС-1 при естественной конвекции.

Заключение. На основании анализа данных научно-технической литературы и проведенных экспериментальных исследований в условиях естественной конвекции жидких УВГ и УВО марки ТС-1 с применением электростатических полей получены следующие результаты:

1) показано, что электростатические поля увеличивают коэффициент теплоотдачи α , а также эффективно предотвращают осадкообразование на поверхности нагретой стенки в жидкой углеводородной среде — в зоне прохождения силовых линий электростатического поля;

2) на основе результатов экспериментов выведено новое критериальное уравнение теплообмена, которое содержит новое число подобия электроконвекции Al и новый симплекс осадкообразования De и позволяет быстро определять коэффициент теплоотдачи в жидких УВГ и УВО одновременно при воздействии электростатического поля и образовании углеродсодержащих осадков на поверхности нагретой стенки.

Установлены следующие факты:

- увеличение значений коэффициента теплоотдачи и площади участка пластины, на котором предотвращено осадкообразование, происходит при повышении подаваемого электростатического напряжения только до зоны насыщения, а в зоне насыщения значения коэффициента теплоотдачи и площади без осадка остаются постоянными независимо от дальнейшего увеличения подаваемого электростатического напряжения;

- дальнейшее увеличение площади участка нагреваемой рабочей пластины, на котором образование осадка предотвращено, возможно путем размещения двух, трех пар соосных рабочих игл и более (с учетом обеспечения пересечений внешних силовых линий E);

- для эффективной работы электрического ветра по интенсификации теплоотдачи и предотвращению осадкообразования в среде жидких УВГ и УВО необходимо подавать электростатическое напряжение

в постоянном режиме одновременно с пуском двигателя или ЭУ наземного, воздушного, аэрокосмического и космического базирования, а отключать напряжение — после останова двигателя или ЭУ и остывания деталей системы топливоподачи и охлаждения до температуры менее 373 К.

Намечены дальнейшие экспериментальные и теоретические исследования влияния электростатических полей на процесс осадкообразования.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Altunin V.A., Altunin K.V., Aliev I.N., Gortyshov Yu.F., Dresvyannikov F.N., Obukhova L.A., Tarasevich S.E., Yanovskaya M.L. Analysis of investigations of electric fields in different media and conditions. *J. of Engineering Physics and Thermophysics*, 2012, vol. 85, no. 4, pp. 959–976.
- [2] Алтунин В.А. *Исследование влияния электростатических и магнитных полей на особенности теплоотдачи к углеводородным горючим и охлаждаемым*. Кн. 2. Казань, Изд-во Казан. гос. ун-та им. В.И. Ульянова-Ленина, 2006, 230 с.
- [3] Миролубов Н.Н., Костенко М.В., Левинштейн М.Л., Тиходеев Н.Н. *Методы расчета электростатических полей*. Москва, Высшая школа, 1963, 416 с.
- [4] Остроумов Г.А. Электрическая конвекция (обзор). *Инженерно-физический журнал*, 1966, т. 10, № 5, с. 683–695.
- [5] Остроумов Г.А. *Взаимодействие электрических и гидродинамических полей*. Москва, Наука, 1979, 320 с.
- [6] Верещагин И.П., Левитов В.И., Мирзабекян Г.З., Пашин М.М. *Основы электрогазодинамики дисперсных сред*. Москва, Энергия, 1974, 306 с.
- [7] Янговский Е.И., Апфельбаум М.С. О силе, действующей от игольчатого электрода, и вызываемых ею течениях. *Магнитная гидродинамика*, 1977, № 4, с. 73–80.
- [8] Болога М.К., Гросу Ф.П., Кожухарь И.А. *Электроконвекция и теплообмен*. Остроумов Г.А., ред. Кишинев, Штиинца, 1977, 320 с.
- [9] Иоссель Ю.Я. *Электрические поля постоянных токов*. Ленинград, Энергоатомиздат, 1986, 158 с.
- [10] Стишков Ю.К., Остапенко А.А. *Электрогидродинамические течения в жидких диэлектриках*. Ленинград, Изд-во Ленингр. ун-та, 1989, 176 с.
- [11] Савиных Б.В., Гумеров Ф.М. *Свойства переноса диэлектрических жидкостей и теплообмен в электрических полях*. Казань, Изд-во ФЭН, 2002, 384 с.
- [12] Grosu F.P., Bologa M.K. Electroisothermal Convection and Its Role in the Process of Heat Exchange. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2008, vol. 44, no. 3, pp. 187–194.
- [13] Саранин В.А. *Устойчивость равновесия, зарядка, конвекция и взаимодействие жидких масс в электрических полях*. Москва, Ижевск, Изд-во НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2009, 332 с.
- [14] Алтунин К.В. Разработка критериев подобия электроконвекции в углеводородных средах. *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*, 2012, № 1–2, с. 168–171.
- [15] Ильин В.А. Электроконвекция слабопроводящей жидкости в постоянном электрическом поле. *Журнал технической физики*, 2013, т. 83, № 1, с. 64–73.

- [16] Ильин В.А., Мордвинов А.Н., Петров Д.А. Электроконвекция слабопроводящей жидкости при униполярной инжекции заряда в постоянном электрическом поле. *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 2015, т. 147, № 1, с. 181–188.
- [17] Алтунин В.А., Алтунин К.В., Галимов Ф.М., Гортышов Ю.Ф., Дресвянников Ф.Н., Яновский Л.С. Проблема осадкообразования в энергетических установках многофазового использования на жидких углеводородных горючих и охладителях. *Вестник Казан. технол. ун-та*, 2010, № 5, с. 96–102.
- [18] Алтунин К.В., Гортышов Ю.Ф., Галимов Ф.М., Дресвянников Ф.Н., Алтунин В.А. Способы борьбы с осадкообразованием в энергоустановках на жидких углеводородных горючих и охладителях. *Энергетика Татарстана*, 2010, № 3, с. 43–51.
- [19] Алтунин В.А., Алтунин К.В., Гортышов Ю.Ф., Дресвянников Ф.Н., Обухова Л.Н., Платонов Е.Н., Тарасевич С.Э., Яновская М.Л. *Способ определения конфигурации распространения силовых линий электростатических полей в жидких углеводородных средах*. Пат. № 2504843 Российская Федерация, 2014, бюл. № 2, 14 с.
- [20] Алтунин В.А. *Форсунка*. Пат. № 2155910 Российская Федерация, 2004, бюл. № 25, 12 с.
- [21] Алтунин В.А., Алтунин К.В., Галимов Ф.М., Гортышов Ю.Ф., Яновский Л.С. *Головка кольцевой камеры сгорания газотурбинного двигателя*. Пат. № 2452896 Российская Федерация, 2012, бюл. № 16, 20 с.
- [22] Алтунин В.А., Алтунин К.В., Алиев И.Н., Абдуллин М.Р., Давлатов Н.Б., Платонов Е.Н., Яновская М.Л. Некоторые пути повышения эффективности жидких и газообразных углеводородных и азотосодержащих горючих для двигателей летательных аппаратов. *Тепловые процессы в технике*, 2019, т. 11, № 10, с. 453–479.
- [23] Алтунин К.В., Новиков С.Н., Платонов Е.Н., Шигапов Р.Р., Яновская М.Л. Влияние тепловых процессов в углеводородных горючих и охладителях на совершенствование конструктивных схем форсунок и каналов двигателей и энергоустановок летательных аппаратов. *Тр. 51-х Чтений, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К.Э. Циолковского. Секция № 2: «Проблемы ракетной и космической техники»*. Калуга, 20–22 сентября 2016 г. РАН. РАКЦ. Казань, Изд-во Казан. ун-та, 2017, с. 153–168.
- [24] Алтунин В.А., Алтунин К.В., Платонов Е.Н., Новиков С.Н., Миннахметов Л.И., Яновская М.Л. Разработка новых конструктивных схем форсунок двигателей авиационных и аэрокосмических летательных аппаратов. *Сб. тез. докл. 41-х Академических чтений по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства*. Москва, 24–27 января 2017 г., МГТУ им. Н.Э. Баумана. РАН. РОСКОСМОС. РАКЦ. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017, с. 63.
- [25] Алтунин В.А., Алтунин К.В., Алиев И.Н., Обухова Л.А., Платонов Е.Н., Коханова С.Я., Яновская М.Л. Разработка способов борьбы с термоакустическими автоколебаниями давления в топливно-охлаждающих каналах двигателей и энергоустановок летательных аппаратов наземного, воздушного, аэрокосмического и космического применения. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2017, № 10 (691), с. 77–90.
- [26] Алтунин В.А. *Исследование особенностей теплоотдачи к углеводородным горючим и охладителям в энергетических установках многофазового использования. Кн. 1*. Казань, Изд-во Казан. гос. ун-та им. В.И. Ульянова-Ленина, 2005, 272 с.

- [27] Чертков Я.Б. *Современные и перспективные углеводородные реактивные и дизельные топлива*. Москва, Химия, 1968, 356 с.
- [28] Большаков Г.Ф. *Физико-химические основы образования осадков в реактивных топливах*. Ленинград, Химия, 1972, 232 с.
- [29] Яновский Л.С., Иванов В.Ф., Галимов Ф.М., Сапгир Г.Б. *Коксоотложения в авиационных и ракетных двигателях*. Казань, Абак, 1999, 284 с.

Статья поступила в редакцию 10.09.2020

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

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, вып. 1.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2021-1-2049>

Алтунин Константин Витальевич — канд. техн. наук, доцент КНИТУ им. А.Н. Туполева — КАИ. Область деятельности и научные интересы: исследование особенностей тепловых процессов в жидких и газообразных углеводородных горючих и охладителях без влияния и с влиянием электростатических полей; разработка и патентование новых изобретений в области двигателестроения, транспорта, энергетики, спорта. e-mail: altkonst881@yandex.ru

Elaboration of a criterion heat transfer equation of electrostatic fields influence in kerosene medium at free convection and deposit formation

© K.V. Altunin

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI,
Kazan, 420111, Russian Federation

The paper focuses on the problem of deposit formation in engines and power plants operating on liquid hydrocarbon fuels and coolers, and analyzes hydrocarbon deposit formation on heated fuel-delivery metal at increased temperature. First, an experimental setup was created to study the effect of electrostatic fields on the heat transfer intensification in liquid aviation kerosene TS-1 and the process of deposit formation on a heated working plate. Then, the effect of electric wind on thermal processes was visualized using the Tepler optical setup and the influence of electrostatic fields on the processes of heat transfer of deposit formation in the kerosene medium when using coaxial needles as electrodes was studied. Finally, findings of the research were generalized and a new criterion equation with a created dimensionless similarity number of electric convection and deposit formation simplex was introduced.

Keywords: kerosene, free convection, electrostatic fields, electric convection, similarity number, deposit formation

REFERENCES

- [1] Altunin V.A., Altunin K.V., Aliev I.N., Gortyshov Yu.F., Dresvyannikov F.N., Obukhova L.A., Tarasevich S.E., Yanovskaya M.L. Analysis of investigations of electric fields in different media and conditions. *J. of Engineering Physics and Thermophysics*, 2012, vol. 85, no. 4, pp. 959–976.
- [2] 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, Kazan University Publ., 2006, 230 p.
- [3] Miroljubov N.N., Kostenko M.V., Levinshteyn M.L., Tikhodeev N.N. *Metody rascheta elektrosticheskikh poley* [Methods for calculating electrostatic fields]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1963, 416 p.
- [4] Ostroumov G.A. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal — Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 1966, vol. 10, no. 5, pp. 683–695.
- [5] Ostroumov G.A. *Vzaimodeystvie elektricheskikh i gidrodinamicheskikh poley* [Interaction of electric and hydrodynamic fields]. Moscow, Nauka Publ., 1979, 320 p.
- [6] Vereschagin I.P., Levitov V.I., Merzabekyan G.Z., Pashin M.M. *Osnovy elektrogazodinamiki dispersnykh sred* [Fundamentals of electro-gas dynamics of dispersed media]. Moscow, Energiya Publ., 1974, 306 p.
- [7] Yantovskiy E.I., Apfelbaum M.S. *Magnitnaya gidrodinamika — Magnetohydrodynamics*, 1977, no. 4, pp. 73–80.
- [8] Bologa M.K., Grosu F.P., Kozhukhar I.A. *Elektrokonvektsiya i teploobmen* [Electroconvection and heat transfer]. Ostroumov G.A., ed. Kishinev, Shtiintsa Publ., 1977, 320 p.

- [9] Yossel Yu.Ya. *Elektricheskie polya postoyannykh tokov* [Electric fields of direct currents]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1986, 158 p.
- [10] Stishkov Yu.K., Ostapenko A.A. *Elektrohidrodinamicheskie techeniya v zhidkikh dielektrikakh* [Electrohydrodynamic flows in liquid dielectrics]. Leningrad, Leningrad University Publ., 1989, 176 p.
- [11] Savinykh B.V., Gumerov F.M. *Svoystva perenosa dielektricheskikh zhidkostey i teplo- massoobmen v elektricheskikh polyakh* [Transport properties of dielectric fluids and heat and mass transfer in electric fields]. Kazan, FEN Publ., 2002, 384 p.
- [12] Grosu F.P., Bologna M.K. Electroisothermal Convection and Its Role in the Process of Heat Exchange. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2008, vol. 44, no. 3, pp. 187–194.
- [13] Saranin V.A. *Ustoychivost ravnovesiya, zaryadka, konvektsiya i vzaimodeystvie zhidkikh mass v elektricheskikh poliakh* [Equilibrium stability, charging, convection and interaction of liquid masses in electric fields]. Moscow, Izhevsk, Research Center “Regular and Chaotic Dynamics”, 2009, 332 p.
- [14] Altunin K.V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki — Power engineering: research, equipment, technology*, 2012, no. 1–2, pp. 168–171.
- [15] Ilin V.A. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki — Technical Physics*, 2013, vol. 83, no. 1, pp. 64–73.
- [16] Ilin V.A., Mordvinov A.N., Petrov D.A. *Zhurnal eksperimentalnoy i teoreticheskoy fiziki — Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 2015, vol. 147, no. 1, pp. 181–188.
- [17] Altunin V.A., Altunin K.V., Galimov F.M., Gortyshov Iu.F., Dresvyannikov F.N., Yanovskiy L.S. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta (Kazan Technological University Bulletin)*, 2010, no. 5, pp. 96–102.
- [18] Altunin K.V., Gortyshov Yu.F., Galimov F.M., Dresvyannikov F.N., Altunin V.A. *Energetika Tatarstana — Power industry of Tatarstan*, 2010, no. 3, pp. 43–51.
- [19] Altunin V.A., Altunin K.V., Gortyshov Yu.F., Dresvyannikov F.N., Obukhova L.N., Platonov E.N., Tarasevich S.E., Yanovskaya M.L. *Sposob opredeleniya konfiguratsii rasprostraneniya silovykh liniy elektrosticheskikh poley v zhidkikh uglevodorodnykh sredakh* [Method for determining the configuration of the propagation of lines of force of electrostatic fields in liquid hydrocarbon media]. Patent RF no. 2504843, 2014, bul. no. 2, 14 p.
- [20] Altunin V.A. *Forsunka* [The atomizing nozzle]. Patent RF no. 2155910, 2004, bul. no. 25, 12 p.
- [21] Altunin V.A., Altunin K.V., Galimov F.M., Gortyshov Yu.F., Yanovskiy L.S. *Golovka koltsevoy kamery sgoraniya gazoturbinogo dvigatelja* [The head of the annular combustion chamber of a gas turbine engine]. Patent RF no. 2452896, 2012, bul. no. 16, 20 p.
- [22] Altunin V.A., Altunin K.V., Aliev I.N., Abdullin M.R., Davlatov N.B., Platonov E.N., Yanovskaya M.L. *Teplovyje protsessy v tekhnike — Thermal Processes in Engineering*, 2019, vol. 11, no. 10, pp. 453–479.
- [23] Altunin K.V., Novikov S.N., Platonov E.N., Shigapov R.R., Yanovskaya M.L. *Vliyanie teplovykh protsessov v uglevodorodnykh goryuchikh i okhladitelyakh na sovershenstvovanie konstruktivnykh skhem forsunok i kanalov dvigateley i energoustanovok letatelnykh apparatov* [Influence of thermal processes in hydrocarbon fuels and coolers on the improvement of design schemes of nozzles and channels of engines and power plants of aircraft]. *Tr. 51-kh chteniy, posvyashchennykh razrabotke nauchnogo naslediya i razvitiyu idey K.E. Tsiolkovskogo. Sektsiya 2: «Problemy raketnoy i kosmicheskoy tekhniki».* (Kaluga, 20–22 sentyabrya 2016 g.) [Proceedings of 51 readings devoted to the develop-

- ment of the scientific heritage and the development of the ideas of K.E. Tsiolkovsky. Section 2: "Problems of rocket and space technology". (Kaluga, September 20–22, 2016)]. RAS, Tsiolkovsky Russian Academy of Cosmonautics, Kazan, Kazan University Publ., 2017, pp. 153–168.
- [24] Altunin V.A., Altunin K.V., Platonov E.N., Novikov S.N., Minnakhmetov L.I., Yanovskaya M.L. Razrabotka novykh konstruktivnykh skhem forsunok dvigateley aviatsionnykh i aerokosmicheskikh letatelnykh apparatov [Development of new design schemes of nozzles for aircraft and aerospace aircraft engines]. *Sb. tez. dokl. 41kh Akademicheskikh chteniy po kosmonavtike, posvyashchennykh pamyati akademika S.P. Koroleva i drugikh vydayushchikhsia otechestvennykh uchenykh — pionerov osvoeniya kosmicheskogo prostranstva. (24–27 yanvyarya 2017 g., MGTU im. N.E. Baumana, Moskva)* [Collected abstracts and reports of the 41st Academic Readings on Astronautics devoted to the memory of Academician S.P. Korolev and other prominent Russian scientists - pioneers of space exploration. (January 24–27, 2017, Bauman Moscow State Technical University, Moscow)]. RAS, ROSCOSMOS, Tsiolkovsky Russian Academy of Cosmonautics, Moscow, BMSTU Publ., 2017, p. 63.
- [25] Altunin V.A., Altunin K.V., Aliev I.N., Obukhova L.A., Platonov E.N., Kokhanova S.Ya., Yanovskaya M.L. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie — BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2017, no. 10 (691), pp. 77–90.
- [26] Altunin V.A. *Issledovanie osobennostey teplootdachi k uglevodorodnym goryuchim i okhladitelyam v energeticheskikh ustanovkakh mnogorazovogo ispolzovaniya. Kn. 1* [Investigation of the peculiarities of heat transfer to hydrocarbon fuels and refrigerants in reusable power plants. Book 1]. Kazan, Kazan University Publ., 2005, 272 p.
- [27] Chertkov Ya.B. *Sovremennye i perspektivnye uglevodorodnye reaktivnye i dizelnye topliva* [Modern promising hydrocarbon jet and diesel fuels]. Moscow, Khimiya Publ., 1968, 356 p.
- [28] Bolshakov G.F. *Fiziko-khimicheskie osnovy obrazovaniya osadkov v reaktivnykh toplivakh* [Physicochemical foundations of deposit formation in jet fuels]. Leningrad, Khimiya Publ., 1972, 232 p.
- [29] Yanovskiy L.S., Ivanov V.F., Galimov F.M., Sapgir G.B. *Koksootlozheniya v aviatsionnykh i raketnykh dvigatelyakh* [Coke deposition in aircraft and rocket engines.]. Kazan, Abak Publ., 1999, 284 p.

Altunin K.V., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI. Research interests: study of the features of thermal processes in liquid and gaseous hydrocarbon fuels and refrigerants without and with the influence of electrostatic fields; development and patenting of new inventions in the field of engine building, transport, energy, sports. e-mail: altkonst881@yandex.ru