

Методики расчета тепловых процессов в условиях естественной конвекции газообразного метана при влиянии электростатических полей

© В.А. Алтунин¹, К.В. Алтунин¹, М.Р. Абдуллин¹, М.Р. Чигарев¹,
И.Н. Алиев², М.Л. Яновская³

¹КНИТУ–КАИ им. А.Н. Туполева, Казань, 420111, Россия

²МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

³ЦИАМ им. П.И. Баранова, Москва, 111116, Россия

На основе обзора и анализа научно-технической литературы, а также результатов экспериментальных исследований разработаны новые методики расчета тепловых процессов, происходящих в газообразном метане при его естественной конвекции, при влиянии электростатических полей. Показаны способы расчета и определения коэффициентов теплоотдачи к газообразному метану при влиянии электрического ветра, а также способы расчета и определения влияния электростатических полей на негативный процесс осадкообразования на нагреваемой экспериментальной рабочей пластине в объеме газообразного метана. Разработана общая методика эффективного и безопасного применения электростатических полей в газообразном метане. Эту методику необходимо выполнять при расчетах, проектировании, создании и эксплуатации новых двигателей, энергоустановок и техносистем летательных аппаратов одно- и многоразового использования наземного, воздушного, аэрокосмического и космического базирования.

Ключевые слова: газообразный метан, естественная конвекция, методики расчета влияния электростатических полей на теплоотдачу и осадкообразование, двигатели, энергоустановки и техносистемы летательных аппаратов

Введение. На основе своих результатов экспериментальных исследований создавали методики расчета влияния электростатических полей E или электрического ветра (электрический ветер — это разновидность электростатических полей, возникающий при использовании игольчатых электродов) на теплоотдачу к воздуху и к различным газам такие ученые, как: М.К. Болога, Р.Ф. Бабой, Л.М. Молдавский, В.М. Бузник, Г.П. Величенко, В.Д. Шкилев., В.Д. Михайлеску, Н.Н. Миролубов, М.В. Костенко, И.П. Верещагин, В.И. Левитов, Г.З. Мирзабекян, М.М. Пашин, Ф.П. Гросу, К.Н. Семенов, И.Н. Макаренко, В.В. Пушков, С.В. Сюткин, Г.А. Остроумов, Н.А. Капцов, Ю.Н. Петров, Л.Д. Ландау, Л.В. Морар, Р. Мосс, Д. Грей, Дж. Гроетзингер, Р. Аллен, Х.Р. Велкоф, Х. Сентфлебен, Ю.З. Браун, Р. Крониг, Н. Шварц и др. [1–15].

Все перечисленные выше ученые создавали подходы к объяснению влияния E (или электрического ветра) на теплоотдачу к различным газам в условиях их естественной конвекции, приводили

различные формулы расчета этого влияния, но до сих пор нет единых теории и формул расчета. Отсутствуют формулы расчета влияния E на теплоотдачу к газообразному метану в условиях его естественной конвекции, а также формулы для расчета влияния E на предотвращение осадкообразования δ_{oc} на нагреваемых деталях в газообразном метане.

Исходя из обзора и анализа научно-технической литературы [1–31], общими можно назвать только формулу относительного коэффициента теплоотдачи, а также формулу относительного числа Нуссельта, которые показывают эффект увеличения теплоотдачи за счет E , причем это касается не только газообразных сред, но и жидких.

Например, относительный коэффициент теплоотдачи к жидкости или к газу при влиянии E рассчитывают по формуле

$$K_E = \alpha_E / \alpha_0,$$

где α_E — коэффициент теплоотдачи к жидкости или к газу при влиянии E ; α_0 — коэффициент теплоотдачи к жидкости или к газу без влияния E .

Относительный коэффициент числа Нуссельта для жидкостей или газов при влиянии E определяют по выражению

$$K_E = Nu_E / Nu_0,$$

где Nu_E — число Нуссельта для жидкостей или газов при влиянии E ; Nu_0 — число Нуссельта для жидкостей или газов без влияния E .

Цель настоящей статьи — разработать методику расчета влияния E на тепловые процессы в газообразном метане при его естественной конвекции.

Авторами настоящей статьи разработана общая методика применения E в различных газообразных углеводородных горючих и охлаждающих (УВГ и УВО), в том числе и в метане, которую обязательно необходимо учитывать:

– при расчете значений K_E , α_E , Nu_E ;

– при расчете, проектировании, создании и эксплуатации новых двигателей, энергоустановок (ЭУ) и техносистем (ТС) одно- и много-разового использования (ЭУМИ, ТСМИ) наземного, воздушного, аэрокосмического и космического базирования двойного назначения.

Общие правила, допущения и требования по применению электростатических полей. На основе экспериментальных исследований разработаны общие правила, допущения и требования, которые необходимо учитывать и выполнять при использовании и расчетах E по интенсификации теплоотдачи, по предотвращению осадкообразования в газообразных УВГ (УВО) [16–31].

Считаем диэлектрическую проницаемость ε в газообразных УВГ (УВО) постоянной, поэтому в формулах ее не учитываем.

При использовании электродов системы «игла — игла» диаметр рабочих соосных игл $d = (1,0 \dots 3,0) \cdot 10^{-3}$ м, и их углы заточки $j = 15 \dots 85^\circ$ не влияют на интенсификацию теплоотдачи и предотвращение δ_{oc} .

Импульсные включения в работу E без смены и со сменой полярностей с различными временными интервалами $\tau = 0,5 \dots 5$ с не способствуют повышению α_E и предотвращению δ_{oc} из-за времени релаксации электрического ветра.

При естественной конвекции газообразных УВГ (УВО), в том числе и газообразного метана, влияние E на повышение α_E возможно только в зоне интенсификации теплоотдачи.

Дальнейшее увеличение напряжения на электродах (на соосных иглах) в зоне насыщения E приводит к постоянному значению α_E . Граница насыщения E в газообразных УВГ (УВО), например, в газообразном метане, является границей начала коронного разряда.

Импульсное включение E и смена полярностей на электродах недопустимы, так как δ_{oc} в газообразных УВГ (УВО) успевает появиться даже при отключении E в интервале времени $\tau = 0,5 \dots 5,0$ с.

В газообразных УВГ (УВО), включая газообразный метан, любое увеличение давления приводит к изменению α_0 , а при использовании E — к росту значений величины α_E .

Повышение давления в объеме газообразного метана не влияет на распределение и форму силовых линий E , следовательно, не влияет и на увеличение площади (диаметра) нагретой детали, предотвращенной от осадкообразования δ_{oc} .

При $T \geq 313$ К газообразные УВГ (УВО), учитывая и газообразный метан, становятся электропроводными средами.

Для газообразных УВГ (УВО) процесс δ_{oc} начинается при $T_{ст} \geq 573$ К и при любых $p > 0,1$ МПа на любой металлической поверхности:

- на нагреваемой рабочей пластине;
- нагреваемой детали топливно-охлаждающей системы двигателя летательного аппарата.

Предотвращение δ_{oc} для газообразных УВГ (УВО) (далее — везде следует читать «в том числе и для газообразного метана») происходит только в зоне прохождения силовых линий E от двух электродов, например от двух соосных рабочих игл.

В зоне насыщения E при увеличении напряжения на электродах (на соосных иглах) площадь участка (детали), предотвращенная от δ_{oc} , остается постоянной из-за неизменности распространения си-

ловых линий E и расстояния между внешними силовыми линиями E в газообразных УВГ (УВО).

В газообразных УВГ и УВО, например, в газообразном метане, площадь поверхности детали (трубки, пластинки и др.), предотвращенной от δ_{oc} , является несколько увеличенной из-за наличия дополнительных силовых линий, возникающих от светящейся униполярной короны, которая всегда образуется и существует на отдающей игле при использовании электродов типа «игла — игла».

Для эффективной борьбы с δ_{oc} электроды (рабочие соосные иглы или др.) должны находиться над и под нагреваемой деталью на расстоянии h друг от друга, которое подбирается по экспериментальному графику совместно с подаваемым высоковольтным напряжением U при условии, что силовые линии E полностью охватывают деталь (или ее необходимую часть). Возможно горизонтальное или наклонное расположение электродов.

Диаметр защищаемого от δ_{oc} объекта (рабочей пластины, трубки, детали) должен быть равным или меньшим расстояния между внешними силовыми линиями E . Вся система (рабочая пластина, трубка, электроды) при этом находится в среде газообразного УВГ (УВО) с обеспечением гидроэлектроизоляции.

Включение в работу E осуществляется в постоянном режиме без отключений и смены полярностей или импульсной работы одновременно с началом работы ЭУ, ЭУМИ и нагрева рабочего теплового элемента ТВЭЛа (рабочей пластины, трубки, детали). Нагрев может осуществляться от работы двигателя, а также и джоулевым теплом, т. е. электронагревом, выключение — только после останова двигателя, ЭУ, ЭУМИ, ТС, ТСМИ и охлаждения рабочего элемента до $T \leq 373$ К.

Продувка топливно-охлаждающих каналов, фильтров, форсунок и агрегатов двигателей, ЭУ, ЭУМИ, ТС, ТСМИ (или экспериментальной установки) воздухом (кислородом) возможна только после отключения E .

Запрещается проводить продувку рабочего участка или каналов двигателей, ЭУ, ЭУМИ, ТС, ТСМИ воздухом (кислородом) при включенных E , так как может произойти авария из-за влияния искрового разряда на образующуюся при этом газозооветную смесь.

Перед началом расчетов необходимо соблюдать общие правила, допущения и требования по применению E , далее нужно войти в зону возможной интенсификации теплоотдачи и борьбы с осадкообразованием, затем выбрать возможно допустимые значения рабочих параметров U (подаваемое высоковольтное электростатическое напряжение, кВ), h (расстояние между соосными рабочими иглами, мм) из экспериментальных графиков, показанных в материалах предыдущей статьи, опубликованной в [32].

Рассмотрим новые методики расчета влияния E на тепловые процессы в газообразном метане при его естественной конвекции.

Методики расчета коэффициента теплоотдачи к газообразному метану в условиях его естественной конвекции при влиянии электростатических полей. При расчетах влияния E в условиях естественной конвекции газообразного метана считаем, что относительный коэффициент теплоотдачи зависит от следующих параметров [16–31]:

$$K_E = f(U, h, p, q),$$

где U — подаваемое высоковольтное электростатическое напряжение; h — расстояние между соосными рабочими иглами; p — давление газообразного метана (в экспериментальной бомбе, в двигателе, в ЭУ, ТС, ЭУМИ, ТСМИ); q — плотность теплового потока.

Влияние электростатических полей на теплоотдачу к газообразному метану при его естественной конвекции можно оценивать относительным коэффициентом теплоотдачи по формуле

$$K_E = \alpha_E / \alpha_0,$$

где α_E — коэффициент теплоотдачи к газообразному метану при влиянии электростатических полей; α_0 — коэффициент теплоотдачи к газообразному метану без влияния электростатических полей.

Значения α_0 при различных рабочих параметрах можно определить:

– из экспериментальной базы данных (из экспериментальных графиков и таблиц авторов настоящей статьи), часть которых была приведена в [33].

– по методикам, изложенным в ОСТ 92-0289-73;

– формулам, приведенным в [33].

Значения α_E берутся:

– из экспериментальной базы данных;

– экспериментальных графиков и таблиц авторов настоящей статьи, показанных в [32].

Проводить оценку влияния E на теплоотдачу к газообразному метану можно по формуле

$$K_E = Nu_E / Nu_0,$$

где Nu_E — значение числа Нуссельта для газообразного метана при влиянии электростатических полей; Nu_0 — значение числа Нуссельта для газообразного метана без влияния электростатических полей.

Значения Nu_0 для рабочих параметров по давлению $p = 0,1 \dots 7,0$ МПа, по плотностям теплового потока $q = (4 \dots 24) \cdot 10^4$ Вт/м², по величинам $GrPr = 6770 \dots 226\,645$ с точностью 0,5...13 % вычисляются по экспериментальной формуле, приведенной в [33].

На основе результатов экспериментальных исследований были созданы уникальные способы прямого расчета значений K_E . Например, значения K_E с точностью 0,5...15 % вычисляются по экспериментальной формуле

$$K_E = \left(\frac{U_n}{U_{n0}} \right)^a \left(\frac{h}{h_0} \right)^b \left(\frac{p}{p_0} \right)^c \left(\frac{q}{q_0} \right)^d,$$

где рабочие параметры и экспериментальные значения коэффициентов a, b, c, d сведены в табл. 1.

Таблица 1

Экспериментальные значения коэффициентов a, b, c, d

| p , МПа | $h = (5 \dots 15) \cdot 10^{-3}$ м; $h_0 = 1 \cdot 10^{-3}$ м; $q = (0,1 \dots 24) \cdot 10^4$ Вт/м ² ; $q_0 = 1 \cdot 10^6$ Вт/м ² ; $U_n = (0 \dots 35)$ кВ; $U_0 = 1$ кВ | | | |
|-----------|--|-------|-------|-------|
| | a | b | c | d |
| 0,1–6,0 | 0,13 | –0,11 | 0,33 | –0,19 |
| 6,0–7,0 | 0,34 | –0,11 | –0,08 | –0,14 |

Другой способ расчета значений K_E с точностью 3...12 % представлен в табл. 2.

Таблица 2

Значения относительного коэффициента теплоотдачи к газообразному метану в условиях естественной конвекции

| p , МПа | $q = (1 \dots 25) \cdot 10^4$ Вт/м ² ; $q_0 = 1$ Вт/м ² ; $h = (5 \dots 15) \cdot 10^{-3}$ м; $h_0 = 1$ м; $U = (5 \dots 30)$ кВ; $U_0 = 1$ кВ; $p_0 = 1$ МПа |
|-----------|--|
| 1,0–5,5 | $K_E = 0,5 \sqrt[3]{\frac{U h_0 q_0 p}{U_0 h q p_0}}$ |
| 5,5–7,0 | $K_E = 0,33 \sqrt[3]{\arctg \left(\frac{2 p_0}{p} \sqrt{\frac{U h_0 q_0}{U_0 h q}} \right)}$ |

Для примера на рисунке приведена зависимость числа Nu_E от логарифма числа Релея в условиях естественной конвекции газообразного метана при различных расстояниях между соосными рабочими иглами при $U = 15$ кВ.

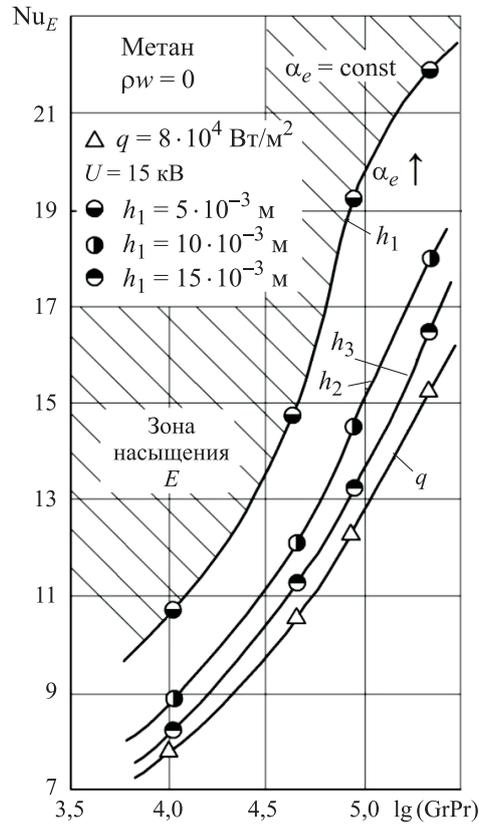


Рис. 1. Зависимость числа Nu_E от логарифма числа Релея в условиях естественной конвекции метана при различных расстояниях между соосными рабочими иглами при $U_{и} = 15$ кВ

Зная величины K_E , α_0 и Nu_0 , возможно сразу, если необходимо, вычислить значения α_E и Nu_E по формулам:

$$\alpha_E = K_E \alpha_0; \quad Nu_E = K_E Nu_0.$$

Далее рассмотрим методики расчета влияния E на предотвращение осадкообразования на нагреваемых деталях двигателей, ЭУ, ЭУМИ, ТС, ТСМИ, находящихся в их топливно-охлаждающих системах в среде газообразного метана.

Методики расчета влияния электростатических полей на предотвращение осадкообразования на нагреваемых деталях, находящихся в газообразном метане. При расчетах влияния E на процесс осадкообразования $\delta_{ос}$ в газообразном метане в условиях его

естественной конвекции можно найти диаметр окружности поверхности без осадка на нагреваемой детали (рабочем участке, на пластине, на трубке и т. д.) при электродах типа «игла — игла» двумя способами [16–30]:

1) из экспериментальной базы данных с точностью 5...8 % (из экспериментальных графиков и таблиц авторов статьи, частично показанных в [32]);

2) с точностью 10...12 % по экспериментальной формуле при конкретных необходимых и достаточных значениях h и U :

$$d = 3,13 (U h^2_0) / (U_0 h),$$

где U — текущее значение подаваемого электростатического напряжения, кВ; $U_0 = 1$ кВ; h — текущее значение расстояния между соосными рабочими иглами, м · 10⁻³; $h_0 = 1$ м.

Все новые методики расчета влияния E на тепловые процессы в газообразном метане следует проводить с учетом общей методики, главными пунктами которой являются:

– учет зоны эффективности, а также зоны насыщения и коронного разряда;

– включение E осуществлять совместно с запуском двигателя, т. е. до нагрева деталей, а выключение E — после охлаждения двигателя до температуры менее 373 К;

– обеспечивать работу E в постоянном режиме без смены полярностей и отключений.

Заключение. Настоящая статья позволяет быстро и без проведения сложных и дорогих экспериментальных исследований находить важные значения влияния E на теплоотдачу и осадкообразование в газообразном метане.

Материал статьи будет полезным для ученых и разработчиков новых метановых наземных, воздушных, аэрокосмических и космических двигателей, энергоустановок и техносистем одно- и много-разового использования различного назначения с повышенными характеристиками по ресурсу, надежности, эффективности и экономичности.

Материалы статьи внедрены:

– после проведения НИР в наземные ЭУМИ марок НК-8-2У, НК-16 СТ, НК-18 СТ, которые эффективно применяются на станциях газоперекачки РФ;

– в работу гражданских и оборонных КБ и НИИ Российской Федерации;

– учебно-научную деятельность ведущих вузов Российской Федерации и военных вузов Российской Федерации.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Алтунин В.А. *Исследование влияния электростатических и магнитных полей на особенности теплоотдачи к углеводородным горючим и охлаждаемым*. Кн. 2. Казань, Изд-во КГУ им. В.И. Ульянова-Ленина, 2006, 230 с.
- [2] Алтунин В.А., Алтунин К.В., Алиев И.Н., Гортышов Ю.Ф., Дресвянников Ф.Н., Обухова Л.А., Тарасевич С.Э., Яновская М.Л. Анализ исследований электрических полей в различных средах и условиях. *Инженерно-физический журнал*, 2012, т. 85, № 4, с. 881–896.
- [3] Altunin V.A., Altunin K.V., Aliev I.N., Gortyshev, Dresvyannikov F.N., Obukhova L.A., Tarasevich S.E., Yanovskaya M.L. Analysis of investigations of electric fields in different media and conditions. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2012, vol. 85, no. 4, pp. 959–976.
- [4] Морар А.В. Влияние коронного разряда на конвективный теплообмен. *Физическая газодинамика и свойства газов при высоких температурах*. Москва, Наука, 1964, с. 197–213.
- [5] Шкилев В.Д., Михайлеску В.Д. О возможности построения электрогазодинамической системы охлаждения газовых лазеров. *ЭОМ*, 1994, № 2, с. 37–40.
- [6] Молдавский Л.М., Болога М.К. О влиянии электрического ветра на теплопередающие характеристики газонаполненной трубы. *ЭОМ*, 1983, № 6, с. 60–64.
- [7] Миролубов Н.Н., Костенко М.В. *Методы расчета электростатических полей*. Москва, Высшая школа, 1963, 416 с.
- [8] Верещагин И.П., Левитов В.И., Мирзабекян Г.З., Пашин М.М. *Основы электрогазодинамики дисперсных систем*. Москва, Энергия, 1974, 306 с.
- [9] Бабой Р.Ф., Болога М.К., Семенов К.Н. Воздействие электрических полей на теплообмен в жидкостях и газах. *ЭОМ*, 1965, № 1, с. 57–71.
- [10] Бузник В.М., Величенко Г.П. Свободная конвекция частично ионизированного воздуха в электростатическом поле. *ЭОМ*, 1967, № 6, с. 52–57.
- [11] Остроумов Г.А. Электрическая конвекция. *ИФЖ*, 1991, т. 10, № 5, с. 683–695.
- [12] Moss R.A., Grey J. Heat transfer augmentation by steady and alternating electric fields. *Proceeding of the 1966 Heat Transfer and Fluid Mechanics Institute. Santa Clara, CA, 22–24 June, 1966, Stanford University*. Stanford, Stanford University Press, 1966, pp. 210–235.
- [13] Senfleben H., Braun W.Z. *Physik*. 1936, vol. 102, no. 480, pp. 480–506.
- [14] Kronig R., Schwarz N. On the theory of heat transfer from a wire in an electric field. *Applied Science Res.*, 1949, vol. AI, pp. 35–36.
- [15] Пушкин В.В., Болога М.К., Сюткин С.В. Об интенсификации теплопередачи через газозвесь в однородном электрическом поле. *ЭОМ*, 1973, № 4, с. 36–41.
- [16] Алтунин В.А., Алтунин К.В., Платонов Е.Н., Коханова С.Я., Абдуллин М.Р., Яновская М.Л. Границы применения электростатических полей в условиях естественной и вынужденной конвекции газообразного метана. *Сб. тез. докл. Всероссийской научно-технической конференции «Авиадвигатели 21 века», посвященной 85-летию ЦИАМ им. П.И. Баранова. Москва, ЦИАМ, 24–27 ноября 2015 г. Сек. № 7. Авиационная химмотология*. Москва, Изд-во ЦИАМ, 2015, с. 971–973.
- [17] Алтунин В.А., Абдуллин М.Р. Исследование возможности применения газообразного метана в рубашках охлаждения промышленных энергоустановок. *Материалы Международной молодежной научной конференции (школы молодых ученых) «22 Туполевские чтения»*. Казань, КНИТУ-КАИ, 19–21 октября 2015 г. Казань, Фолиант, 2015, с. 425–430.

- [18] Абдуллин М.Р., Коханова Ю.С., Шигапов Р.Р. Исследование влияния магнитных и электростатических полей на тепловые процессы в газообразном метане в условиях его естественной конвекции. *ВОЕНМЕХ. Вестник БГТУ*, 2016, № 31, с. 8.
- [19] Алтунин В.А., Алтунин К.В., Абдуллин М.Р., Коханова Ю.С., Яновская М.Л. Разработка методик расчета теплоотдачи к газообразному метану в условиях его естественной и вынужденной конвекции. *Сб. тез. докл. 41-х Академических чтений по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства. 24–27 января 2017 г., МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва. РАН. РОСКОСМОС. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017, с. 122–123.*
- [20] Алтунин В.А., Алтунин К.В., Абдуллин М.Р., Коханова Ю.С., Яновская М.Л. Разработка методик расчета влияния электростатических полей на тепловые процессы в газообразном метане. *Сб. матер. докл. 42 академических чтений по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства. Москва, 23–26 января 2018, МГТУ им. Н.Э. Баумана, РАН. РОСКОСМОС. РАКЦ. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018, с. 133–134.*
- [21] Алтунин В.А., Алтунин К.В., Абдуллин М.Р., Коханова Ю.С., Куимов Е.С., Яновская М.Л. Разработка методик расчета тепловых процессов в газообразном метане при влиянии электростатических полей. *Материалы докладов Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения», посвященной Генеральному конструктору аэрокосмической техники академику Н.Д. Кузнецову. Самара, СНИУ им. акад. С.П. Королева, 12–14 сентября 2018 г. Самара, Изд-во Самарского университета, 2018, с. 238–239.*
- [22] Абдуллин М.Р., Яновская М.Л. Разработка методик расчета коэффициента теплоотдачи к газообразному метану. *Материалы докладов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием: «Новые технологии, материалы и оборудование Российской авиакосмической отрасли», посвященной 130-летию со дня рождения выдающегося авиаконструктора А.Н. Туполева. («АКТО — 2018»). Казань, 8–10 августа 2018 г., КГУ. Казань, Изд-во КГУ, 2018, т. 1, с. 317–322.*
- [23] Алтунин В.А., Абдуллин М.Р., Коханова Ю.С., Яновская М.Л. Разработка методик расчета тепловых процессов в газообразном метане для перспективных двигателей, энергоустановок и техносистем наземного, воздушного, аэрокосмического и космического базирования. *ВОЕНМЕХ. Вестник БГТУ*, 2018, № 44, с. 34–35.
- [24] Алтунин В.А., Абдуллин М.Р., Давлатов Н.Б., Зырянов С.П. Разработка методик расчета тепловых процессов в рубашках охлаждения жидкостных ракетных двигателей на жидких и газообразных горючих и охладителях. *Сб. тез. докл. 45-й Международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения — 2019». Москва, 16–19 апреля 2021 г., МАИ. Москва, Изд-во МАИ, 2019, с. 150.*
- [25] Алтунин В.А., Абдуллин М.Р., Давлатов Н.Б., Шигапов Р.Р., Яновская М.Л. Исследование возможности интенсификации теплоотдачи к жидким и газообразным углеводородным и азотосодержащим горючим и охладителям. *Сборник тезисов докладов Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых и специалистов «Авиационные двигатели и силовые установки». ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова», 28–30 мая 2019 г., г. Москва. Москва, Изд-во ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова», 2019, с. 316–317.*

- [26] 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.
- [27] Алтунин В.А., Алтунин К.В., Абдуллин М.Р., Яновская М. Анализ результатов экспериментальных исследований газообразного метана в условиях его естественной конвекции. *Труды 54-х Чтений, посвященных разработке его естественной конвекции. Труды 54-х Чтений, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К.Э. Циолковского. Калуга, 17–18 сентября 2019 г. РАН. РАКЦ. Казань, Изд-во КГУ, 2020, с. 83–93.*
- [28] Алтунин В.А., Абдуллин М.Р., Ефимов Д.Е., Шигапов Р.Р. Особенности тепловых процессов в жидких и газообразных углеводородных горючих и охладителях в двигателях летательных аппаратов. *Сб. научных статей 8-й Междунар. науч.-практ. конф. «Академические Жуковские чтения», посвящ. 100-летию юбилею Военно-воздушной академии. Воронеж, 25–26 ноября 2020 г. Главное командование ВКС России. ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина. Воронеж, Изд-во ВУНЦ ВВС «ВВА», 2020, с. 20–22.*
- [29] Алтунин В.А., Абдуллин М.Р., Яновская М.Л. Особенности тепловых процессов в рубашке охлаждения метанового ЖРД. *Труды 12-й Общероссийской молодежной научно-технической конференции «Молодежь. Техника. Космос». 23–25 апреля 2020 г., г. Санкт-Петербург, БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова. Санкт-Петербург, БГТУ «ВОЕНМЕХ», 2020, т. 1, с. 18–20.*
- [30] Алтунин В.А., Алтунин К.В., Абдуллин М.Р., Азина Ж.В., Чигарев М.Н., Алиев И.Н., Самедова З.А. Особенности применения электростатических полей в условиях естественной конвекции газообразного метана. *Труды 11-й Всероссийской конференции «Необратимые процессы в природе и технике». Москва, 26-29 января 2021 г. РАН. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Физический институт им. П.Н. Лебедева. Центр прикладной физики МГТУ им. Н.Э. Баумана. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021, ч. 2, с. 135–139.*
- [31] Алтунин В.А., Алтунин К.В., Алиев И.Н., Гортышов Ю.Ф., Давлатов Н.Б., Зарипова М.А., Керножицкий В.А., Колычев А.В., Разносчиков В.В., Сафаров М.М., Яновский Л.С., Яновская М.Л. *Некоторые пути повышения эффективности жидкостных реактивных двигателей летательных аппаратов на углеводородных и азотосодержащих горючих и охладителях. Казань, Школа, 2020, 148 с.*
- [32] Алтунин В.А., Алтунин К.В., Абдуллин М.Р., Чигарев М.Р., Алиев И.Н., Яновская М.Л. Экспериментальное исследование влияния электростатических полей на тепловые процессы в газообразном метане при его естественной конвекции. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2021, вып. 6. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2021-6-2086>
- [33] Алтунин В.А., Алтунин К.В., Абдуллин М.Р., Чигарев М.Р., Алиев И.Н., Яновская М.Л. Экспериментальное исследование тепловых процессов в газообразном метане при его естественной конвекции. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2021, вып. 5. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2021-5-2080>

Статья поступила в редакцию: 31.05.2021

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Алтунин В.А., Алтунин К.В., Абдуллин М.Р., Чигарев М.Р., Алиев И.Н., Яновская М.Л. Методики расчета тепловых процессов в условиях естественной конвекции газообразного метана при влиянии электростатических полей. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2021, вып. 7.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2021-7-2094>

Алтунин Виталий Алексеевич — д-р техн. наук, профессор кафедры «Теплотехники и энергетического машиностроения», КНИТУ–КАИ им. А.Н. Туполева; академик РАКЦ им. К.Э. Циолковского, президент КазРО РАКЦ.
e-mail: altspacevi@yahoo.com

Алтунин Константин Витальевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Теплотехники и энергетического машиностроения», КНИТУ–КАИ им. А.Н. Туполева.
e-mail: _altkonst881@yandex.ru

Абдуллин Мансур Рустамович — аспирант кафедры «Теплотехники и энергетического машиностроения», КНИТУ–КАИ им. А.Н. Туполева.
e-mail: mansur1392@mail.ru

Чигарев Марат Ренатович — магистрант кафедры «Теплотехники и энергетического машиностроения», КНИТУ–КАИ им. А.Н. Туполева.
e-mail: chigarev_marat@mail.ru

Алиев Исмаил Новрузович — д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры «Техническая физика», МГТУ им. Н.Э. Баумана; академик РАЕН, профессор Академии военных наук. e-mail: alievprof@yandex.ru

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

Methods for calculating thermal processes under conditions of natural convection of gaseous methane under the influence of electrostatic fields

© V.A. Altunin¹, K.V. Altunin¹, M.R. Abdullin¹, M.R. Chigarev¹,
I.N. Aliev², M.L. Yanovskaya³

¹Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI,
Kazan, 420111, Russia

²Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

³Central Institute of Aviation Motors, Moscow, 111116, Russia

Relying on the review and analysis of scientific and technical literature, as well as the results of experimental studies, we developed new methods for calculating thermal processes occurring in gaseous methane during its natural convection, under the influence of electrostatic fields. In this study we show methods for calculating and determining the coefficients of heat transfer to gaseous methane under the influence of electric wind, as well as methods for calculating and determining the effect of electrostatic fields on the negative process of sedimentation on a heated experimental working plate in the volume of gaseous methane. A general method has been developed for the effective and safe application of electrostatic fields in gaseous methane, which must be carried out in the calculations, design, creation, and operation of new engines, power plants, and techno systems for single and reusable ground, air, aerospace and space-based aircraft.

Keywords: *gaseous methane, natural convection, methods for calculating the effect of electrostatic fields on heat transfer and sedimentation, engines, aircraft power plants and techno-systems*

REFERENCES

- [1] Altunin V.A. *Issledovanie vliyaniya elektrosticheskikh i magnitnykh poley na osobennosti teplootdachi k uglevodorodnym goryuchim i okhladitelyam. Kniga 2* [Study of the influence of electrostatic and magnetic fields on the characteristics of heat transfer to hydrocarbon fuels and coolants. Book 2]. Kazan, Kazan. gos. univer. im. V.I. Ulyanova – Lenina Publ., 2006, 230 p.
- [2] Altunin V.A., Altunin K.V., Aliev I.N., Gortyshov Yu.F., Dresvyannikov F.N., Obukhova L.A., Tarasevich S.E., Yanovskaya M.L. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal — Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2012, vol. 85, no. 4, pp. 881–896.
- [3] Altunin V.A., Altunin K.V., Aliev I.N., Gortyshov, Dresvyannikov F.N., Obukhova L.A., Tarasevich S.E., Yanovskaya M.L. Analysis of investigations of electric fields in different media and conditions. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2012, vol. 85, no. 4, pp. 959–976.
- [4] Morar A.V. *Vliyanie koronnogo razryada na konvektivny teploobmen. Fizicheskaya gazodinamika i svoystva gazov pri vysokikh temperaturakh* [Influence of corona discharge on convective heat transfer. Physical gas dynamics and properties of gases at high temperatures]. Moscow, Nauka Publ., 1964, pp. 197–213.
- [5] Shkilev V.D., Mikhaylesku V.D. *EOM — Electronic Processing of Materials*, 1994, no. 2, pp. 37–40.
- [6] Moldavskiy L.M., Bologa M.K. *EOM — Electronic Processing of Materials*, 1983, no. 6, pp. 60–64.

- [7] Mirolyubov N.N., Kostenko M.V. *Metody rascheta elektrosticheskikh poley* [Methods for calculating electrostatic fields]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1963, 416 p.
- [8] Vereschagin I.P., Levitov V.I., Mirzabekyan G.Z., Pashin M.M. *Osnovy elektrogazodinamiki dispersnykh sistem* [Fundamentals of electro-gas dynamics of dispersed systems]. Moscow, Energiya Publ., 1974, 306 p.
- [9] Baboy R.F., Bologa M.K., Semenov K.N. *EOM — Electronic Processing of Materials*, 1965, no. 1, pp. 57–71.
- [10] Buznik V.M., Velichenko G.P. *EOM — Electronic Processing of Materials*, 1967, no. 6, pp. 52–57.
- [11] Ostroumov G.A. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal — Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 1991, vol. 10, no. 5, pp. 683–695.
- [12] Moss R.A., Grey J. *Proceeding of the 1966 Heat Transfer and Fluid Mechanics Institute*. Stanford Univ. Press, Stanford, California, 1966, pp. 210–235.
- [13] Senfleben H., Braun W.Z. *Physik*, 1936, vol. 102, no. 480, pp. 480–506.
- [14] Kronig R., Schwarz N. On the theory of heat transfer from a wire in an electric field applied scientific research. *Applied Science Res.*, 1949, vol. AI, pp. 35–36.
- [15] Pushkov V.V., Bologa M.K., Syutkin S.V. *EOM — Electronic Processing of Materials*, 1973, no. 4, pp. 36–41.
- [16] Altunin V.A., Altunin K.V., Platonov E.N., Kokhanova S.Ya., Abdullin M.R., Yanovskaya M.L. Granitsy primeneniya elektrosticheskikh poley v usloviyakh estestvennoy i vynuzhdennoy konveksii gazoobraznogo metana [The limits of application of electrostatic fields in conditions of natural and forced convection of gaseous methane]. *Sb. tez. dokl. Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Aviadvigateli 21 veka», posvyashchennoy 85-letiyu TsIAM im. P.I. Baranova (Moskva, TsIAM, 24–27 noyabrya 2015 g.)*. [Collection of abstracts of the All-Russian Scientific and Technical Conference “Aircraft Engines of the 21st Century”, dedicated to the 85th anniversary of Central Institute of Aviation Motors (Moscow, CIAM, November 24–27, 2015)]. Moscow, CIAM Publ., 2015, pp. 971–973.
- [17] Altunin V.A., Abdullin M.R. Issledovanie vozmozhnosti primeneniya gazoobraznogo metana v rubashkakh okhlazhdeniya promyshlennykh energoustanovok [Study of the possibility of using gaseous methane in the cooling jackets of industrial power plants]. *Materialy Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchnoy konferentsii (shkoly molodykh uchenykh) «22 Tupolevskie chteniya» (Kazan, KNITU-KAI, 19–21 oktyabrya 2015 g.)* [Materials of the International Youth Scientific Conference (School of Young Scientists) “22 Tupolev Readings”. (Kazan, KAI, October 19–21, 2015)]. Kazan, Foliant Publ., 2015, pp. 425–430.
- [18] Abdullin M.R., Kokhanova Yu.S., Shigapov R.R. Issledovanie vliyaniya magnitnykh i elektrosticheskikh poley na teplovy protsessy v gazoobraznom metane v usloviyakh ego estestvennoy konveksii [Study of the influence of magnetic and electrostatic fields on thermal processes in gaseous methane under conditions of its natural convection]. *Molodezh. Tekhnika. Kosmos: materialy VIII Obshcherossiyskoy molodezhnoy nauch.-tekhn. konf.* [The Youth. Engineering. Space: materials of the VIII All-Russian youth scientific and technical. conf.]. St. Petersburg, Baltic State Technical University “VOENMEH” D.F. Us-tinov Publ., 2016, p. 8.
- [19] Altunin V.A., Altunin K.V., Abdullin M.R., Kokhanova Yu.S., Yanovskaya M.L. Razrabotka metodik rascheta teplotdachi k gazoobraznomu metanu v usloviyakh ego estestvennoy i vynuzhdennoy konveksii [Development of methods for calculating heat transfer to gaseous methane under conditions of its natural and forced

- convection]. *Sb. tez dokl. 41 Akademicheskikh chteniy po kosmonavtike, posvyashchennykh pamyati akademika S.P. Koroleva i drugikh vydayuschikhsia otechestvennykh uchenykh – pionerov osvoeniya kosmicheskogo prostranstva. (24–27 yanvarya 2017 g., MGTU im. N.E. Baumana, Moskva). RAN. ROSKOSMOS* [Collection of abstracts of the 41 Academic Readings on Cosmonautics dedicated 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]. Moscow, BMSTU Publ., 2017, pp. 122–123.
- [20] Altunin V.A., Altunin K.V., Abdullin M.R., Kokhanova Yu.S., Yanovskaya M.L. Razrabotka metodik rascheta vliyaniya elektrosticheskikh poley na teplovy protsessy v gazoobraznom metane [Development of methods for calculating the effect of electrostatic fields on thermal processes in gaseous methane]. *Sb. mater. dokl. 42 Akademicheskikh chteniy po kosmonavtike, posvyashchennykh pamyati akademika S.P. Koroleva i drugikh vydayuschikhsia otechestvennykh uchenykh – pionerov osvoeniya kosmicheskogo prostranstva. RAN. ROSKOSMOS. RAKTs* [Collection of abstracts of the 42nd Academic Readings on Cosmonautics dedicated to the memory of academician S.P. Korolev and other prominent Russian scientists — pioneers of space exploration. RAS. ROSCOSMOS. RACT]. Moscow, BMSTU Publ., 2018, pp. 133–134.
- [21] Altunin V.A., Altunin K.V., Abdullin M.R., Kokhanova Yu.S., Kuimov E.S., Yanovskaya M.L. Razrabotka metodik rascheta teplovykh protsessov v gazoobraznom metane pri vliyani elektrosticheskikh poley [Development of methods for calculating thermal processes in gaseous methane under the influence of electrostatic fields]. *Materialy dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Problemy i perspektivy razvitiya dvigatelestroeniya», posvyashchennoy Generalnomu konstrukturu aerokosmicheskoy tekhniki akademiku N.D. Kuznetsovu. (Samara, SNIU im. akad. S.P. Koroleva, 12–14 sentyabrya 2018 g.)*. [Proceedings of the International Scientific and Technical Conference “Problems and Prospects for the Development of Engine Building” dedicated to the General Designer of Aerospace Engineering Academician N.D. Kuznetsov. (Samara, Samara University, September 12–14, 2018)] Samara, Samara University Publ., 2018, pp. 238–239.
- [22] Abdullin M.R., Yanovskaya M.L. Razrabotka metodik rascheta koeffitsienta teplootdachi k gazoobraznomu metanu [Development of methods for calculating the coefficient of heat transfer to gaseous methane]. *Materialy dokladov Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem: «Novye tekhnologii, materialy i oborudovanie Rossiyskoy aviakosmicheskoy ot-rasli», posvyashchennoy 130-letiyu so dnya rozhdeniya vydayuschegosya avia-konstruktora A.N. Tupoleva. (AKTO – 2018). (Kazan, 8–10 avgusta 2018 g.)*. [Materials of papers of the All-Russian scientific-practical conference with international participation: "New technologies, materials and equipment of the Russian aerospace industry", dedicated to the 130th anniversary of the birth of the outstanding aircraft designer A.N. Tupolev. (AKTO – 2018). (Kazan, August 8–10, 2018)]. Kazan, KAI Publ., 2018, vol. 1, pp. 317–322.
- [23] Altunin V.A., Abdullin M.R., Kokhanova Yu.S., Yanovskaya M.L. Razrabotka metodik rascheta teplovykh protsessov v gazoobraznom metane dlya perspektivnykh dvigateley, energoustanovok i tekhnosistem nazemnogo, vozdušnogo, aerokosmicheskogo i kosmicheskogo bazirovaniya [Development of methods for calculating thermal processes in gaseous methane for advanced engines, power plants and technical systems for ground, air, aerospace and space-based modes]. *Materialy dokladov 10 Obscherossiyskoy molodezhnoy nauchno-*

- tekhnicheskoy konferentsii «Molodezh. Tekhnika. Kosmos». Sektsiya: «Raketno-kosmicheskaya i aviatsionnaya tekhnika». T. 1. Sankt-Peterburg, 18–20 aprelya 2018 g. [The Youth. Engineering. Space: materials of the X All-Russian youth scientific and technical. conf., vol. 1. St. Petersburg, April 18–20, 2018]. St. Petersburg, Baltic State Technical University “VOENMEH” D.F. Ustinov, Info-Da Publ., 2018, pp. 34–35.
- [24] Altunin V.A., Abdullin M.R., Davlatov N.B., Zyryanov S.P. Razrabotka metodik rascheta teplovykh protsessov v rubashkakh okhlazhdeniya zhidkostnykh raketnykh dvigateley na zhidkikh i gazoobraznykh goryuchikh i okhladitelyakh [Development of methods for calculating thermal processes in cooling jackets of liquid-propellant rocket engines using liquid and gaseous fuels and coolers]. *Sb. tez. dokl. 45 Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchnoy konferentsii «Gagarinskie chteniya – 2019»*. [Collection of abstracts of the 45th International Youth Scientific Conference “Gagarin Readings – 2019”]. Moscow, MAI Publ., 2019, pp. 150.
- [25] Altunin V.A., Abdullin M.R., Davlatov N.B., Shigapov R.R., Yanovskaya M.L. Issledovanie vozmozhnosti intensivatsii teplootdachi k zhidkim i gazoobraznym uglevodorodnym i azotosoderzhashchim goryuchim i okhladitelyam [Investigation of the possibility of intensifying heat transfer to liquid and gaseous hydrocarbon and nitrogen-containing fuels and coolers]. *Sbornik tezisov dokladov Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov «Aviatsionnye dvigateli i silovye ustanovki»*. (FGUP «TsIAM im. P.I. Baranova», 28–30 maya 2019 g., g. Moskva) [Collection of abstracts of the All-Russian Scientific and Technical Conference of Young Scientists and Specialists “Aircraft Engines and Power Plants”. (Central Institute of Aviation Motors, May 28–30, 2019, Moscow)]. Moscow, CIAM Publ., 2019, pp. 316–317.
- [26] Altunin V.A., Altunin K.V., Aliev I.N., Abdullin M.R., Davlatov N.B., Platonov E.N., Yanovskaya M.L. *Teplovye protsessy v tekhnike — Thermal Processes in Engineering*, 2019, vol. 11, no. 10, pp. 453–479.
- [27] Altunin V.A., Altunin K.V., Abdullin M.R., Yanovskaya M.L. Analiz rezultatov eksperimentalnykh issledovaniy gazoobraznogo metana v usloviyakh ego estestvennoy konveksii [Analysis of the results of experimental studies of gaseous methane under conditions of its natural convection]. *Trudy 54 Chteniy, posvyashchennykh razrabotke nauchnogo naslediya i razvitiyu idey K.E. Tsiolkovskogo*. (Kaluga, 17–18 sentyabrya 2019 g.). RAN. RAKTs [Proceedings of the 54 Readings devoted to the development of the scientific heritage and the development of the ideas of K.E. Tsiolkovsky. (Kaluga, September 17–18, 2019). RAS. RACT]. Kazan, KAI Publ., 2020, pp. 83–93.
- [28] Altunin V.A., Abdullin M.R., Efimov D.E., Shigapov R.R. Osobennosti teplovykh protsessov v zhidkikh i gazoobraznykh uglevodorodnykh goryuchikh i okhladitelyakh v dvigatelyakh letatelnykh apparatov [Features of thermal processes in liquid and gaseous hydrocarbon fuels and coolants in aircraft engines]. *Sb. nauchnykh statey 8 Mezhdunarod. nauchno-prakt. konf. «Akademicheskie Zhukovskie chteniya», posvyashch. 100-letnemu yubileiu Voenno-vozdushnoy akademii (Voronezh, 25–26 noyabrya 2020 g.)*. *Glavnoe komandovanie VKS Rossii. VUNTs VVS «Voenno-vozdushnaya akademiya im. professora N.E. Zhukovskogo i Yu.A. Gagarina* [Collection of scientific papers of the 8th international. scientific and practical. conf. "Academic Zhukovsky Readings", dedicated to the 100th anniversary of the Air Force Academy (Voronezh, November 25–26, 2020). The major command of the Russian Aerospace Forces. VUNC VVS "Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin]. Voronezh, VUNTs VVS VVA Publ., 2020, pp. 20–22.

- [29] Altunin V.A., Abdullin M.R., Yanovskaya M.L. Osobennosti teplovykh protsessov v rubashke okhlazhdeniya metanovogo ZhRD [Features of thermal processes in the cooling jacket of a methane rocket engine]. *Trudy 12 Obshcherossiyskoy molodezhnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Molodezh. Tekhnika. Kosmos»*. (23–25 aprelya 2020 g., g. Sankt-Peterburg, BGTU «VOENMEKh» im. D.F. Ustinova). Tom 1 [The Youth. Engineering. Space: materials of the XII All-Russian youth scientific and technical. conf. (April 23–25, 2020, St. Petersburg, BSTU “VOENMEKh” named after D.F. Ustinov), vol. 1]. St. Petersburg, Baltic State Technical University “VOENMEKh” D.F. Ustinov Publ., 2020, pp. 18–20.
- [30] Altunin V.A., Altunin K.V., Abdullin M.R., Azina Zh.V., Chigarev M.N., Aliev I.N., Samedova Z.A. Osobennosti primeneniya elektrostatischeskikh poley v usloviyakh estestvennoy konveksii gazoobraznogo metana [Features of the use of electrostatic fields in conditions of natural convection of gaseous methane]. *Trudy 11 Vserossiyskoy konferentsii «Neobratimye protsessy v prirode i tekhnike»* (Moskva, 26–29 yanvarya 2021 g.). RAN. MGTU im. N.E. Baumana. Fizicheskiiy institut im. P.N. Lebedeva. Tsentri prikladnoy fiziki MGTU im. N.E. Baumana [Proceedings of the 11th All-Russian Conference “Irreversible Processes in Nature and Technology” (Moscow, January 26–29, 2021). RAS. Bauman University. Lebedev Physical Institute. Center for Applied Physics, Bauman University]. Moscow, BMSTU Publ., 2021, part 2, pp. 135–139.
- [31] Altunin V.A., Altunin K.V., Aliev I.N., Gortyshov Yu.F., Davlatov N.B., Zaripova M.A., Kernozhitskiy V.A., Kolychev A.V., Raznoschikov V.V., Safarov M.M., Yanovskiy L.S., Yanovskaya M.L. *Nekotorye puti povysheniya effektivnosti zhidkostnykh reaktivnykh dvigateley letatelnykh apparatov na uglevodorodnykh i azotosoderzhashchikh goryuchikh i okhladitelnykh* [Some ways to improve the efficiency of liquid jet engines of aircraft powered by hydrocarbon and nitrogen-containing fuels and coolers]. Under general editorship of Dr. Sc. (Eng.), Professor L.S. Yanovsky. Kazan, Red.-izd. tsentr Shkola Publ., 2020, 148 p.
- [32] Altunin V.A., Altunin K.V., Abdullin M.R., Chigarev M.R., Aliev I.N., Yanovskaya M.L. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2021, iss. 6.
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2021-6-2086>
- [33] Altunin V.A., Altunin K.V., Abdullin M.R., Chigarev M.R., Aliev I.N., Yanovskaya M.L. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2021, iss. 5.
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2021-5-2080>

Altunin V.A., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Heat and Power Engineering, Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI; Academic of the Russian Academy of Cosmonautics named after K.E. Tsiolkovsky (RACT), President of Kazan Regional Branch of the RACT. e-mail: altspacevi@yahoo.com

Altunin K.V., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Heat and Power Engineering, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI. e-mail: altkonst881@yandex.ru

Abdullin M.R., post-graduate student, Department of Heat and Power Engineering, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI. e-mail: mansur1392@mail.ru

Chigarev M.R., Master's Degree student, Department of Heat and Power Engineering, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI. e-mail: chigarev_marat@mail.ru

Aliev I.N., Dr. Sc. (Phys. and Math), Professor, Department of Technical Physics, Bauman Moscow State Technical University; Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, Professor of the Military Academy. e-mail: alievprof@yandex.ru

Yanovskaya M.L., Cand. Sc. (Eng.), Junior Research Fellow, Central Institute of Aviation Motors. e-mail: maria-yanovskaya-ww@yandex.ru