

## Экспериментальное исследование влияния электростатических полей на тепловые процессы в газообразном метане при его естественной конвекции

© В.А. Алтунин<sup>1</sup>, К.В. Алтунин<sup>1</sup>, М.Р. Абдуллин<sup>1</sup>, М.Р. Чигарев<sup>1</sup>,  
И.Н. Алиев<sup>2</sup>, М.Л. Яновская<sup>3</sup>

<sup>1</sup>КНИТУ–КАИ им. А.Н. Туполева, Казань, 420111, Россия

<sup>2</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

<sup>3</sup>ЦИАМ им. П.И. Баранова, Москва, 111116, Россия

*Показана история исследования электростатических полей в различных газообразных средах, включая газообразный метан. Обоснована необходимость проведения экспериментальных исследований влияния электростатических полей на тепловые процессы в газообразном метане при его естественной конвекции. Описаны экспериментальная база и рабочие участки с применением электростатических полей, раскрыта методика проведения экспериментальных исследований. Представлены результаты влияния электростатических полей на коэффициент теплоотдачи к газообразному метану и на негативный процесс осадкообразования в нем — при его естественной конвекции. Обнаружены зоны возможной интенсификации теплоотдачи к газообразному метану и зоны насыщения электростатическими полями, в которых дальнейшее увеличение коэффициента теплоотдачи невозможно. Экспериментально установлено, что граница зоны начала насыщения электростатическими полями является и началом зоны коронного разряда. Результаты исследований легли в основу методики применения электростатических полей в двигателях и энергоустановках летательных аппаратов.*

**Ключевые слова:** *газообразный метан, естественная конвекция, коэффициент теплоотдачи, осадкообразование, электростатические поля, силовые линии электростатических полей, рабочие соосные иглы, зона возможной интенсификации теплоотдачи, двигатели и энергоустановки летательных аппаратов*

**Введение.** Изучение электричества и электрических полей в мире началось в XVII в., в России — с 1750 г. [1, 2]. В XVIII в. были установлены притяжение разноименных и отталкивание одноименных зарядов, изобретены первый громоотвод и электроскоп, созданы электрические конденсаторы, открыто явление электропроводности сред, выведен закон Кулона, создана феноменологическая электрическая теория.

В XIX в. был изобретен первый генератор электрического тока, были сформулированы законы Ома, Ампера, Кирхгофа, Фарадея, Аррениуса, Гесса и др., создана теория электромагнитного поля Максвелла, открыты явления самоиндукции и электромагнитной индукции, заложены основы классической электронной теории. Появились первые электромоторы, трансформаторы, электромагнитные телеграфы и телефоны, электрические станки и приборы, первые электростанции и лампы накаливания.

В XX в. электрическая энергия стала основой современного промышленного производства и технологических процессов во всем мире. Большое значение приобрело прямое использование электрической энергии для различных процессов, среди которых важное место занимает электрическая конвекция.

Электрическая конвекция (или электрический ветер) — это внутреннее макроскопическое движение слабо проводящих и диэлектрических жидкостей (или газов) в электрическом поле, обусловленное пондеромоторными (электромеханическими) силами. Она является аналогом свободной гравитационной конвекции и новым направлением гидродинамики — электрогидродинамикой (ЭГД), изучающей движение жидкостей и газов в сильном электрическом поле. Электрический ветер при высоких напряжениях был впервые обнаружен на воздухе при использовании электродов в виде тонких проволок, в виде иголок в 1899 г. в Варшаве Н.П. Мышкиным [1, 2], на основе чего он впервые создал электростатический двигатель, который развивал мощность 3500...4500 об/мин. Он также обнаружил свечение на конце электрода и зафиксировал этот эффект на фотопластине, т. е. впервые произвел визуализацию светящейся униполярной короны на отдающем электроде. Им были созданы экспериментальные расчетные таблицы и схемы силовых линий электростатических полей.

Дальнейшее развитие математического описания электростатических явлений и процессов, включая распространение и конфигурацию силовых линий в воздушной и других средах при нормальных условиях, получило в период с 1907 по 1980 гг. и продолжается в XXI в.

Технологические процессы, основанные на воздействии электрического поля, составляют направление, получившее название электронно-ионной технологии (ЭИТ). Ее применение включает множество областей, в том числе транспортировку и ориентацию различных веществ в заданном направлении под действием электрического поля, т. е. данная технология основана на электродинамике аэродисперсных систем, поэтому ЭИТ называют также ЭГД-технологией.

ЭГД-устройство прямого преобразования энергии представляет собой отличное от ЭИТ техническое приложение электрогидродинамики. К нему относятся:

- ЭГД-генераторы;
- ЭГД-насосы и электрореактивные двигатели;
- ЭГД-преобразователи энергии.

Широкое применение в науке и технике получили эффекты электровзрыва, создаваемого ЭГД-преобразователем, в воде и других жидкостях и средах. Электровзрыв широко применяется для разрушения и бурения горных пород при добыче полезных ископаемых и строительстве дорог, при технологических процессах (например,

сварка, штамповка и др.), в научных исследованиях по созданию новых техносистем (например, жидкостная и газовая артиллерия, различные двигатели и устройства). ЭГД-эффекты могут быть использованы в области ЭГД-диагностики для разработки устройств автоматики и определения физических параметров среды. Одним из современных научных направлений является изучение влияния электростатических полей на процесс горения в земных и космических условиях.

За последние 60 лет электростатические поля нашли широкое применение в авиационно-космической технике:

- космические электроракетные двигатели (ЭРД);
- системы сдува газовых пузырей с сеток топливных фильтров жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) и топливных баков в земных и космических условиях;
- обеспечение ионизационного контроля за продуктами сгорания в воздушно-реактивных двигателях (ВРД) и в ЖРД;
- интенсификация процесса горения;
- полная предтопливная подготовка и др.

Обширны и многогранны исследования в области применения электростатических полей в различных жидких и газообразных средах, включая углеводородные.

Данная статья посвящена исследованию влияния электростатических полей на теплоотдачу и осадкообразование в условиях естественной конвекции газообразного метана.

Цель статьи — представить экспериментальное исследование особенностей тепловых процессов в газообразном метане при его естественной конвекции.

**История исследования электростатических полей в газообразных средах.** После Н.П. Мышкина естественную (или свободную) конвекцию газов при использовании электростатических полей изучали ученые Х. Сенфтлебен и В. Браун [3], которые нагревали в горизонтальном цилиндре тонкую проволоку и накладывали на нее электростатические поля, коэффициент теплоотдачи при этом увеличивался до 50 %.

Р. Крониг и Н. Шварц [1, 2] также обнаружили, что при наложении электростатических полей к различным газам теплоотдача увеличивалась до 50 %, но только для газов с наибольшим дипольным моментом.

А.В. Морар [4] в своих исследованиях использовал воздух, аммиак, окись углерода, осветительный газ, гелий, аргон. Оказалось, что электростатические поля обеспечивают значительно большее увеличение коэффициента теплоотдачи, чем переменные.

Эксперименты на воздухе и с газами [1, 2] также проводили ученые И.Т. Аладьев, М.С. Апфельбаум, Р.Ф. Бабой, Э.Я. Блум, М.К. Болога,

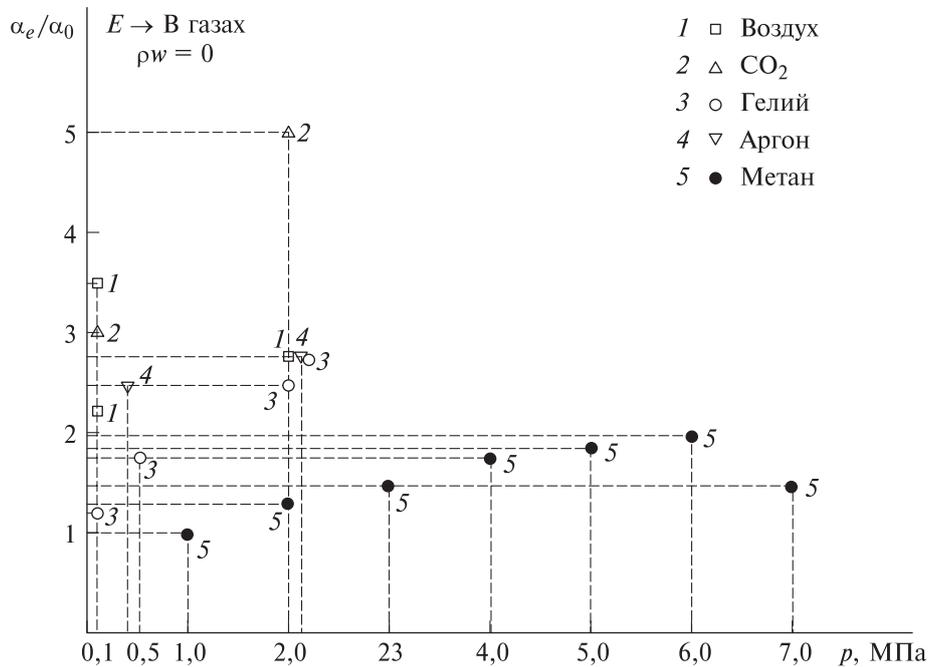
В.И. Бубнов, И.П. Верещагин, Дж. Грей, Ф.П. Гросу, А.Б. Дидковский, В.А. Ефимов, С.М. Климов, И.В. Кожевников, И.А. Кожухарь, В.И. Левитов, О.И. Мардарский, Г.З. Мирзабекян, Л.М. Молдавский, Р.А. Мосс, В.Д. Михайлеску, Г.А. Остроумов, М.М. Пашин, В.В. Пушков, К.Н. Семенов, Г.Ф. Смирнов, С.В. Сюткин, В.Д. Шкилев и др.

Анализ работ по влиянию электростатических полей на теплоотдачу к воздуху и газам при их естественной конвекции показал, что эксперименты на воздухе были проведены в основном при нормальном давлении, а в газах — при сравнительно небольших увеличениях давления. Практически отсутствуют исследования с газообразным метаном.

Влияние электростатических полей на теплоотдачу к газообразному метану при его естественной конвекции, а также к другим газам и жидкостям можно оценивать относительным коэффициентом теплоотдачи:

$$K_e = \alpha_e / \alpha_0,$$

где  $\alpha_e$  — коэффициент теплоотдачи к газообразному метану при влиянии электростатических полей;  $\alpha_0$  — коэффициент теплоотдачи к газообразному метану без влияния электростатических полей.



**Рис. 1.** Результаты ученых-исследователей по влиянию электростатических полей на относительный коэффициент теплоотдачи к газам и воздуху при их естественной конвекции и различных давлениях

Результаты исследования электростатических полей в газах и на воздухе, показанные на рис. 1, проводили ученые: Дж. Гроетзингер, Р. Мосс, Д. Грей, А.Г. Остроумов, В.П. Мотулевич, Ю.Н. Петров, И.Н. Макаренко, К.Н. Семенов, Ф.П. Гросу, М.К. Болога, Н.А. Капцов, А.В. Морар, В.И. Попков, И.П. Верещагин — кривая 1 на рис. 1; А.В. Морар, Л.Д. Ландау, Э.Р. Эккерт, А. Майр, Р. Аллен — кривые 2–4 на рис. 1; В.А. Алтунин — кривая 5 на рис. 1, где  $U = 0...30$  кВ,  $q = (2...24) \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>.

Рассмотрим обоснование необходимости организации и проведения экспериментальных исследований по влиянию электростатических полей на тепловые процессы в газообразном метане при его естественной конвекции.

**Обоснование необходимости исследования влияния электростатических полей на тепловые процессы в газообразном метане.** Из обзора и анализа научно-технической литературы следует, что исследования по влиянию электростатических полей на теплоотдачу к газообразному метану при его естественной конвекции при различных давлениях, а также на негативный процесс осадкообразования в нем не проводились.

Утверждение о том, что процесс осадкообразования в углеводородных средах носит электрический характер, впервые выдвинул советский ученый Г.Ф. Большаков [5]. Он писал, что жидкие углеводородные горючие (УВГ) и охладители (УВО) являются диэлектриками, но при их нагреве до температуры 40 °С (313 К) в них появляются заряженные (+) или (–) частицы, т. е. из диэлектриков жидкие УВГ и УВО превращаются в электропроводные среды, а при нагреве до 100 °С (373 К) в них появляются диполи, которые являются активными участниками осадкообразования. Процесс осадкообразования в жидких УВГ и УВО начинается при температурах более 100 °С (373 К). Любая металлическая поверхность, согласно теории Шоттки и Френкеля, имеет шероховатость в виде микронеровностей. Каждая вершина (острие) микронеровности имеет свой электрический заряд: (+) или (–). Диполи в нагретом жидком УВГ или УВО притягиваются к остриям микронеровностей с противоположным знаком, образуя целые колонии, т. е. диполи являются активными участниками осадкообразования.

Соавтором [5] В.А. Алтуниным было принято решение о проведении экспериментальных исследований по влиянию электростатических и магнитных полей на движение диполей в жидких УВГ и УВО. Было установлено [6], что магнитные поля оказывают очень слабое и незначительное влияние на тепловые процессы в жидких УВГ и УВО, а электростатические поля влияют очень эффективно. Им было обнаружено, что на рабочей нагреваемой пластине, в зоне прохождения силовых линий электростатических полей, осадок

не образуется при любых давлениях в экспериментальной бомбе с жидким УВГ и УВО, а коэффициент теплоотдачи увеличивался в несколько раз (до 650 %).

Учитывая этот опыт с жидкими УВГ и УВО, а также отсутствие исследований с газообразным метаном, было принято решение о проведении всесторонних экспериментальных исследований по влиянию электростатических полей на теплоотдачу и осадкообразование в газообразном метане при его естественной конвекции.

Эти исследования очень важны, так как в сжиженном и газообразном состояниях газ метан широко используется в энергетике, в различных двигателях и энергоустановках летательных аппаратов (ЛА), космических ЛА (КЛА), включая ЖРД, ВРД. Это особенно важно при проектировании и создании новых и инновационных двигателей и энергоустановок наземного, воздушного, аэрокосмического и космического базирования одно- и многоразового использования. Поэтому необходимо проведение крупномасштабных исследований по влиянию электростатических полей на тепловые процессы в газообразном метане в условиях естественной конвекции.

**Экспериментальная база для исследования влияния электростатических полей на тепловые процессы в газообразном метане при его естественной конвекции.** Экспериментальная база для исследования тепловых процессов в условиях естественной конвекции газообразного метана была очень подробно показана и описана авторами в предыдущей статье (см. Инженерный журнал: наука и инновации, вып. 5, 2021).

Экспериментальная установка по исследованию электростатических полей отличается только рабочим участком, который вставляется в экспериментальную бомбу перед началом исследования. Он состоит из постоянных и сменных элементов (рис. 2).

К постоянным элементам относятся:

- крышка 6, в которую вмонтированы через изоляционные прокладки два медных токоввода 5;
- система контроля за подаваемым напряжением 11, 13 для джоулевого нагрева рабочей пластины 1;
- система подачи высоковольтного напряжения 7, 10, 12 для создания электростатических полей на рабочем участке, т. е. на соосных рабочих иглах 2, 3;
- система контроля 4 (термопара) процесса изменения температуры 8 (потенциометр) рабочей пластины 1.

К сменным элементам рабочего участка относятся:

- рабочая пластина 1 из нержавеющей стали марки 1Х18Н9Т размерами  $(50 \times 2 \times 0,2) \times 10^{-3}$  м, закрепленная в нижней части токовводов 5;
- термопара 4, изготовленная из хромель-алюмелевых проволок диаметром  $0,08 \times 10^{-3}$  м, приваренная к центру рабочей пластины 1 и

выведенная через изоляционные прокладки в крышке 6 к потенциометру 8;

– рабочие элементы 2, 3 (две соосные иглы из нержавеющей проволоки диаметром  $1,2 \times 10^{-3}$  м), на которые подается высоковольтное постоянное напряжение в пределах от 0 до 50 кВ для создания различных напряженностей электростатических полей; расстояние между иглами  $h$  меняется и фиксируется в пределах  $(5 \dots 15) \times 10^{-3}$  м.

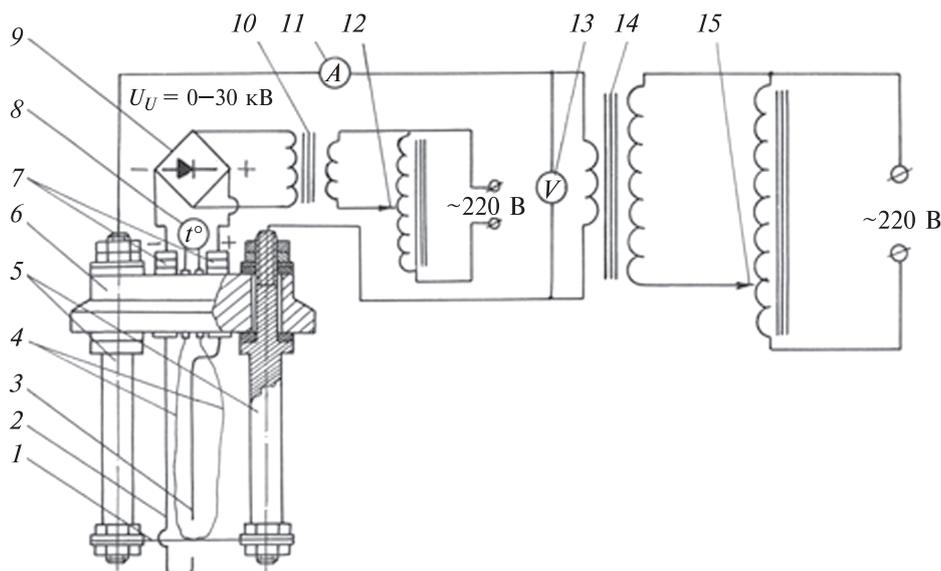


Рис. 2. Схема рабочего участка с электростатическими полями

Источником создания и регулирования электростатического напряжения в пределах  $(5 \dots 50)$  кВ являлся прибор 9 марки АФ-3. Термопары приваривались к каждой сменной рабочей пластине с помощью электросварки путем подачи электроразрядного импульса.

Пробные опыты проводили с различными рабочими элементами (типа пластина — пластина, кольцо — пластина, сетка — сетка, игла — пластина и др.), но для основных исследований были выбраны две соосные иглы, так как только с их помощью можно эффективно и детально визуализировать все термодинамические процессы, происходящие в бомбе, и почти без потерь реализовать подаваемую энергию электростатического поля (для создания электрического ветра), что значительно облегчает расчеты и увеличивает точность измерений, а также сравнивать полученные результаты с результатами исследований других авторов.

**Методика проведения экспериментальных исследований тепловых процессов в газообразном метане при использовании электростатических полей.** Каждый эксперимент состоял из этапов его подготовки и проведения. На этапе подготовки (см. рис. 2) проводили следующие операции:

- ввели фиксированное расстояние между соосными рабочими иглами 2, 3 ( $h = 5$  мм);
- закрепили рабочую пластину с приваренной термопарой, концы которой проводили через электро- и гидроизоляционные каналы в запорной крышке и подсоединяли к потенциометру;
- разместили рабочий участок внутри бомбы;
- установили на экспериментальную бомбу уплотнительные (резинное и металлическое) кольца, плотно, до упора, закрутили крышку;
- закрыли выпускной вентиль;
- порцию газообразного метана заправили в полость бомбы;
- далее закрыли впускной вентиль;
- зафиксировали конкретное рабочее давление в бомбе.

На этапе проведения (см. рис. 2) выполняли следующее:

- включали прибор АФ-3,
- на отдающую иглу 2 в постоянном режиме подавали начальное электростатическое напряжение  $U_{и} = 5$  кВ;
- проводили джоулев нагрев рабочей пластины до определенной температуры (подавались и фиксировались напряжение и сила тока);
- фиксировали итоговую температуру пластины в течение 10 мин.

Следующий опыт проводили с новой пластиной при тех же условиях, но при большем джоулевым нагреве рабочей пластины. После серии таких экспериментов приступали к следующей серии, в которой устанавливали большее давление в экспериментальной бомбе. Максимальное давление газообразного метана составляло 7,0 МПа.

Следующие циклы таких же экспериментов выполняли при расстояниях между соосными рабочими иглами 10 и 15 мм.

После каждого эксперимента осуществляли следующие операции:

- отключали электропитание рабочего участка и электростатическое напряжение на приборе АФ-3;
- открывали выпускной вентиль с продувкой бомбы воздухом;
- отворачивали запорную крышку, вынимали уплотнительные кольца и рабочий участок;
- откручивали рабочую пластину от рабочего участка и отправляли на дальнейшее обследование (на наличие осадкообразования и его предотвращение).

Далее рабочий участок и всю экспериментальную установку приводили в исходное состояние для проведения следующего эксперимента.

После осуществления основных серий и циклов экспериментов совершили дополнительные эксперименты:

- 1) со сменой полярности на рабочих иглах с различными временными интервалами 0,5...5 с, чтобы определить влияние смены направления электрического ветра на изменение теплоотдачи к газообразному метану и на осадкообразование (и его предотвращение);

2) с различными рабочими соосными иглами, изготовленными из проволоки диаметром 1...3 мм, чтобы определить влияние толщины игл на теплоотдачу и осадкообразование в газообразном метане;

3) с различными углами заточки рабочих соосных игл 15...85° для определения влияния степени заточки рабочих соосных игл на тепловые процессы в газообразном метане;

4) с длительностью эксперимента 60 мин и более для определения эффективности влияния электростатических полей на тепловые процессы в газообразном метане;

5) при включении электростатических полей в постоянном режиме и в режиме импульсного включения (включения-отключения) с различными интервалами времени после некоторого времени нагрева рабочей пластины для определения дальнейшего роста осадка.

После этих экспериментальных исследований были проведены первичная и вторичная обработка результатов.

**Результаты экспериментальных исследований по влиянию электростатических полей на теплоотдачу к газообразному метану.** Результаты экспериментальных исследований показали следующее:

1) электростатические поля понижают температуру нагреваемой рабочей пластины (рис. 3–5), следовательно, происходит интенсификация теплоотдачи к газообразному метану:

$$\Delta T = T_{ст} - T_{г},$$

где  $T_{ст}$  — температура стенки рабочей пластины;  $T_{г}$  — температура газа (газообразного метана);

2) увеличение расстояния между соосными рабочими иглами приводит к уменьшению эффекта понижения температуры нагреваемой рабочей пластины при различных давлениях (см. рис. 4), поэтому интенсификация теплоотдачи к газообразному метану также будет снижаться (см. рис. 5);

3) повышение давления в экспериментальной бомбе изменяет относительный коэффициент теплоотдачи к газообразному метану  $K_e$  по-особому закону (рис. 6);

4) повышение плотности теплового потока приводит к уменьшению относительного коэффициента теплоотдачи к газообразному метану  $K_e$  с дальнейшим установлением постоянных значений (см. рис. 5, 6);

5) существует граница зоны возможной интенсификации теплоотдачи к газообразному метану в условиях его естественной конвекции при влиянии электростатических полей. Установлено, что она одновременно является границей как начала коронного пробойного разряда, так и начала зоны насыщения электростатическими полями (см. рис. 4, 7);

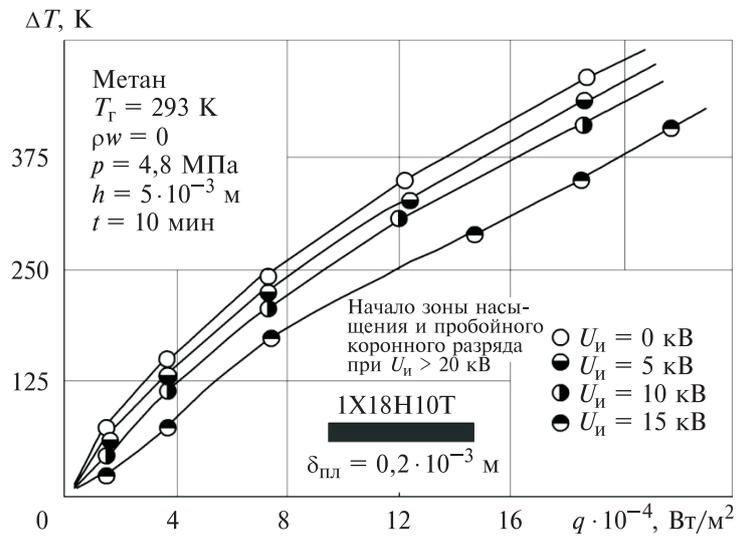


Рис. 3. Влияние электростатических полей на понижение температуры рабочей пластины при  $h = 5$  мм

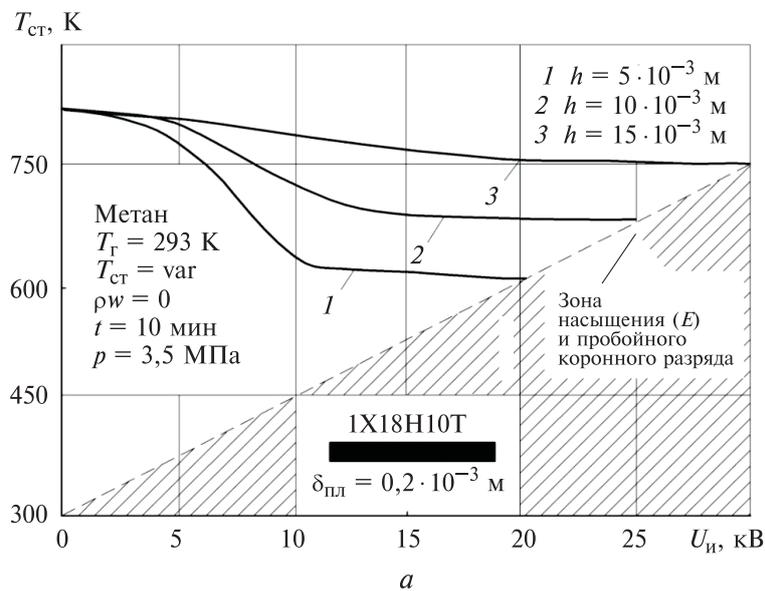
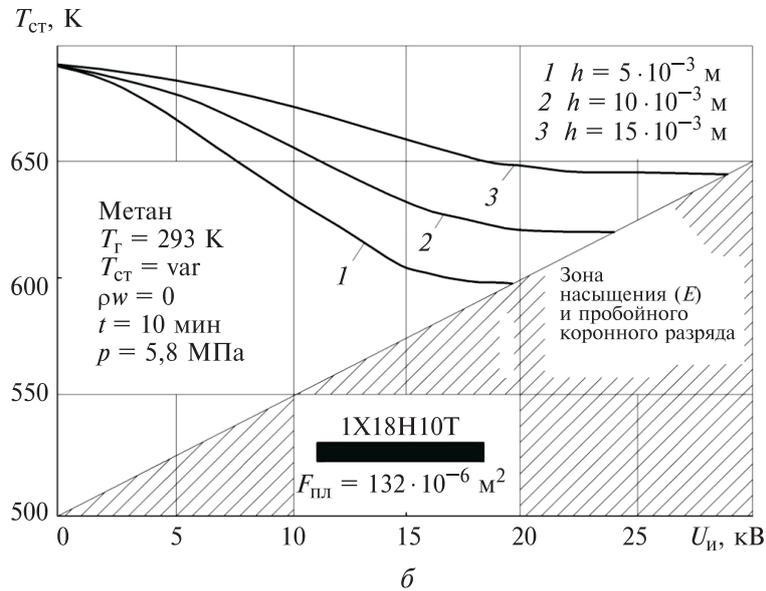
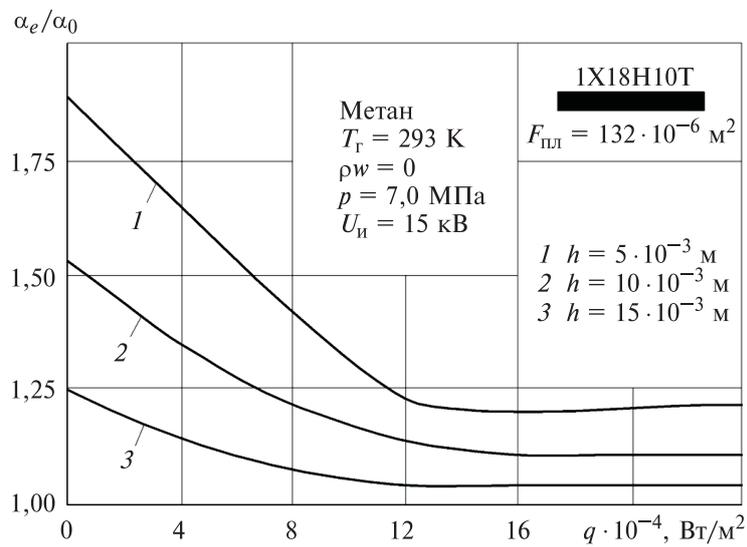


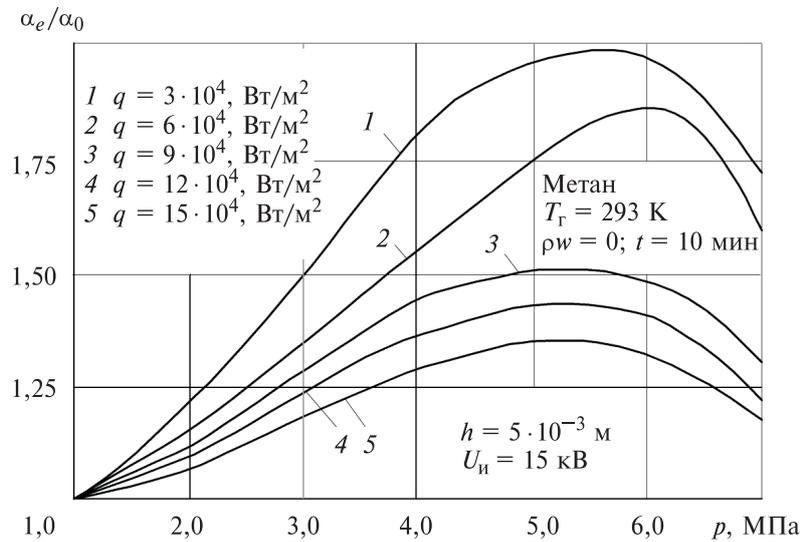
Рис. 4 (начало). Влияние электростатических полей на понижение температуры рабочей пластины при различных расстояниях между соосными рабочими иглами и при давлении 3, 5 МПа (а)



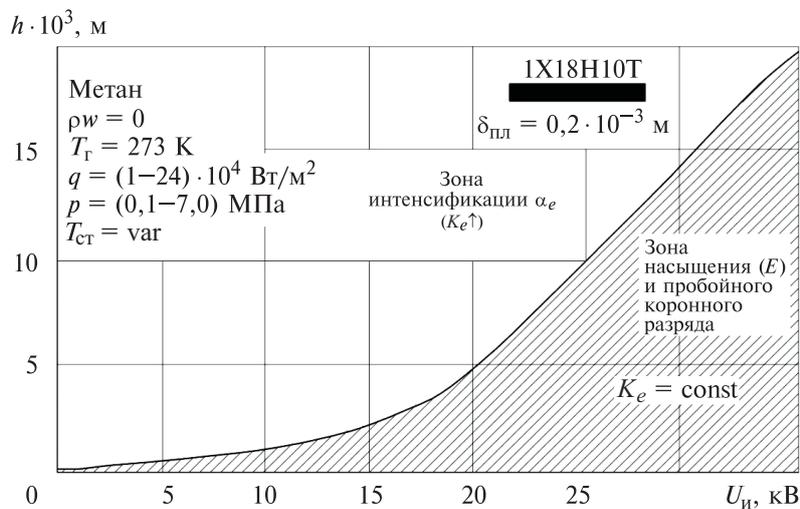
**Рис. 4 (окончание).** Влияние электростатических полей на понижение температуры рабочей пластины при различных расстояниях между соосными рабочими иглами и при давлении 5,8 МПа (б)



**Рис. 5.** Влияние плотности теплового потока на интенсификацию теплоотдачи к газообразному метану при влиянии электростатических полей при давлении 7,0 МПа



**Рис. 6.** Влияние давления на относительный коэффициент теплоотдачи к газообразному метану при  $h = 5$  мм при различных плотностях теплового потока



**Рис. 7.** Граница возможной зоны интенсификации теплоотдачи к газообразному метану в условиях его естественной конвекции при влиянии электростатических полей

б) в зоне возможной интенсификации теплоотдачи к газообразному метану увеличение подаваемого на рабочие соосные иглы электростатического напряжения приводит к понижению температуры стенки рабочей пластины, т. е. к увеличению коэффициента теплоотдачи  $\alpha_e$ ;

7) в зоне насыщения и коронного разряда дальнейшее увеличение подаваемого электростатического напряжения не приводит к ожидаемому понижению температуры стенки нагреваемой рабочей пластины и, соответственно, к увеличению коэффициента теплоотдачи (см. рис. 4), относительный коэффициент теплоотдачи  $K_e$  при этом будет иметь постоянные значения, которые у него были при приближении к границе этой зоны, или меньшие значения, что связано с началом коронного пробойного разряда (см. рис. 7);

8) импульсное включение в работу соосных рабочих игл с интервалами от 0,5 до 5 с (со сменой и без смены полярностей на рабочих иглах) не влияет на температуру стенки нагреваемой рабочей пластины и на теплоотдачу к газообразному метану;

9) изменение толщины соосных рабочих игл 1...3 мм и их углов заточки 15...85° не влияет на изменение температуры стенки нагреваемой рабочей пластины и на изменение коэффициента теплоотдачи к газообразному метану при воздействии электростатических полей  $\alpha_e$ ;

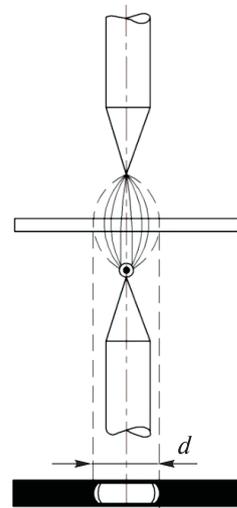
Далее рассмотрим влияние электростатических полей на процесс осадкообразования в среде газообразного метана.

**Результаты экспериментальных исследований по влиянию электростатических полей на осадкообразование в газообразном метане.** Проведенные экспериментальные исследования по влиянию электростатических полей на осадкообразование в газообразном метане показали:

1) в зоне прохождения силовых линий электростатического поля на нагреваемой рабочей пластине, размещенной между соосными рабочими иглами, осадок не образуется (рис. 8). Светящаяся униполярная корона на отдающей (нижней) рабочей игле образует дополнительные внешние силовые линии (штриховые линии), которые увеличивают площадь поверхности рабочей пластины, предотвращенной от осадкообразования;

2) светящаяся униполярная корона, которая практически всегда появляется на отдающей рабочей игле, создает дополнительные силовые линии, которые способствуют увеличению той площади рабочей пластины, на которой предотвращено образование осадка (см. рис. 8);

3) в зоне возможной интенсификации теплоотдачи к газообразному метану (см. рис. 6) увеличение подаваемого на рабочие соосные иглы электростатического напряжения приводит к увеличению расстояния между внешними силовыми



**Рис. 8.** Влияние электростатических полей в газообразном метане на предотвращение осадкообразования в зоне прохождения силовых линий

ми линиями, что провоцирует увеличение площади рабочей пластины, предотвращенной от осадкообразования. Если между соосными рабочими иглами провести плоскость, то силовые линии электростатического поля в разрезе будут представлять круг, поэтому авторами настоящей статьи диаметр этого круга обозначили через букву  $d$ , что в реальности будет показывать расстояние между внешними силовыми линиями электростатического поля (см. рис. 8);

4) интенсификация теплоотдачи к газообразному метану (путем турбулизации и перемешивания пристенного слоя газа метана из-за работы электрического ветра) происходит на всей рабочей пластине, а предотвращение осадка наблюдается только в зоне прохождения силовых линий электростатического поля;

5) в зоне насыщения и коронного разряда дальнейшее повышение подаваемого электростатического напряжения не приводит к ожидаемому увеличению расстояния между внешними силовыми линиями, т. е. к дальнейшему расширению площади рабочей пластины, предотвращенной от осадкообразования (см. рис. 8). Установлено, что в зоне насыщения и коронного пробойного разряда процесса предотвращения осадкообразования не происходит, так как образуется утечка электрических зарядов через коронный разряд с исчезновением силовых линий (рис. 9);

6) импульсное включение в работу соосных рабочих игл с интервалами от 0,5 до 5 с со сменой и без смены полярностей на рабочих иглах приводит к появлению осадка на рабочей пластине даже в зоне прохождения силовых линий;

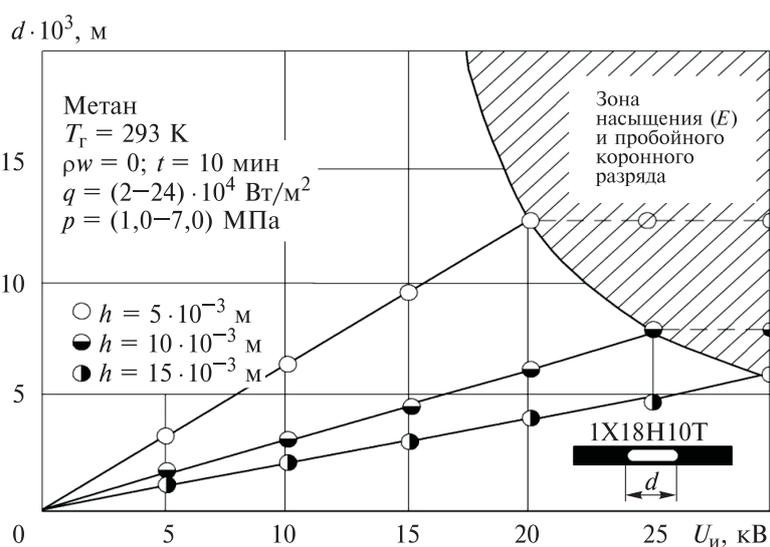


Рис. 9. Влияние электростатических полей на предотвращение осадкообразования в газообразном метане

7) изменение толщины соосных рабочих игл 1...3 мм и их углов заточки 15...85° не влияет на расстояние между внешними силовыми линиями электростатического поля, т. е. на площадь пластины, предотвращенной от осадкообразования;

8) давление не оказывает влияния на распространение и конфигурацию силовых линий электростатического поля, что еще раз подтверждает результаты исследования электростатических полей в различных средах, полученных В.И. Попковым [7].

Распространение и конфигурация силовых линий постоянного электростатического поля в любых средах не зависит от давления. Это научное утверждение опубликовал в 1973 г. В.И. Попков, известный ученый СССР [7]. В.А. Алтунин ранее подтвердил данное научное утверждение, особенно при проведении исследований электростатических полей в жидких УВГ и УВО [6, 8, 9]. В газообразных УВГ и УВО, в частности в газообразном метане, это доказано авторами настоящей статьи, где к основным внешним силовым линиям электростатического поля всегда прибавляются дополнительные внешние силовые линии от светящейся униполярной короны на отдающей игле (см. рис. 8).

На основе проведенных экспериментальных исследований авторами этой статьи созданы методики расчета тепловых процессов в газообразном метане в условиях его естественной конвекции при влиянии электростатических полей, о чем готовится статья в следующем выпуске данного журнала.

**Заключение.** Проведенные экспериментальные исследования по влиянию электростатических полей на теплоотдачу к газообразному метану и осадкообразование в нем в условиях естественной конвекции позволили авторам статьи выявить особенности этого влияния и создать банк экспериментальных данных.

Процесс предотвращения осадкообразования на нагреваемой металлической поверхности в объеме газообразного метана с помощью электростатических полей внесен авторами статьи в классификацию средств и способов борьбы с осадкообразованием в углеводородных средах как новый и перспективный способ предотвращения осадкообразования, а кроме того, ими были расширены горизонты областей и направлений применения электростатических полей в газообразных УВГ и УВО, а также в науке и технике в целом.

Применение материалов данной статьи позволит создавать новую и инновационную технику, двигатели и энергоустановки наземного, воздушного, аэрокосмического и космического базирования одно- и многофазового использования повышенных характеристик по ресурсу, надежности, эффективности, выживаемости и экономичности [10–18].

ЛИТЕРАТУРА

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Senftleben H., Braun W.Z. Der einfluss electricer felder auf der waermestrom in gasen. *Zeitschrift fuer Physik*, 1936, Bd. 102, S. 480–506.
- [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] Большаков Г.Ф. *Физико-химические основы образования осадков в реактивных топливах*. Ленинград, Наука, 1982, с. 147–154.
- [6] 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.
- [7] Попков В.И. О развитии исследований в области электрификации и электротехники применительно к задачам большой энергетики. *Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт*, 1973, с. 3–17.
- [8] Алтунин В.А., Алтунин К.В., Алиев И.Н. и др. *Некоторые пути повышения эффективности жидкостных реактивных двигателей летательных аппаратов на углеводородных и азотосодержащих горючих и охладителях*. Л.С. Яновский, ред. Казань, Изд-во «Школа», 2020, 148 с.
- [9] Алтунин В.А., Алтунин К.В., Абдуллин М.Р., Платонов Е.Н., Яновская М.Л. Некоторые пути развития реактивных двигателей летательных аппаратов. *Военмех. Вестник БГТУ*, 2019, № 55, с. 419–424.
- [10] Алтунин В.А., Алтунин В.А. (научн. рук.), Абдуллин М.Р., Новиков С.Н., Коханова Ю.С. Исследование тепловых процессов в газообразном метане. *42-е Гагаринские чтения. Сек. № 51. Проектирование и конструкция авиационных двигателей и энергетических установок: матер. док. междунар. науч.-техн. конф. Москва, 12–15 апреля 2016 г., МАИ*. Москва, Изд-во МАИ, 2016, с. 657–658.
- [11] 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. *Сб. тез. докл. Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых и специалистов «Авиационные двигатели и силовые установки»*. Сек. № 7. *Авиационная химмотология*. Москва, 28–30 мая 2019, ЦИАМ им. П.И. Баранова. Москва, Изд-во ЦИАМ им. П.И. Баранова, 2019, с. 316–317.
- [12] Алтунин В.А., Алтунин К.В., Абдуллин М.Р., Яновская М. Анализ результатов экспериментальных исследований газообразного метана в условиях его естественной конвекции. *Тр. 54 Научных чтений РАН, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К.Э. Циолковского*. Сек. № 2. *Проблемы ракетной и космической техники*. Калуга, 20–22 сентября 2016, ЦИАМ. Калуга, Изд-во «Наша Полиграфия», 2016, с. 83–93.

- [13] Чернощекоев Л.Н. Природный газ метан — топливо будущего. *АГЗК+АТ*, 2010, № 2 (50), с. 58–61.
- [14] Бакулин В.Н., Брещенко Е.М., Дубовкин Н.Ф., Фаворский О.Н. *Газовые топлива и их компоненты. Свойства, получение, применение, экология*. Москва, Изд-во МЭИ, 2009, 614 с.
- [15] Коватова Ю.С., Воробьев А.Г., Боровик И.Н., Хохлов А.Н., Казеннов И.С. Жидкостной ракетный двигатель малой тяги на топливе газообразный кислород и газообразный метан — разработка, проектирование, испытания и анализ полученных результатов. *Вестник МАИ*, 2011, т. 18, № 3, с. 45–54.
- [16] Белов Е.А., Богушев В.Ю., Клепиков И.А., Смирнов А.И. Результаты экспериментальных работ в НПО «Энергомаш» по освоению метана как компонента топлива для ЖРД. *Труды НПО «Энергомаш» имени академика В.П. Глушко*, 2000, т. XVIII, с. 86–100.
- [17] Горохов В.Д., Кунавин С.П. Работы КБХА по созданию перспективных ЖРД на компонентах топлива кислород-метан. *Научно-технический сборник КБ Химавтоматики*. Воронеж, Изд-во ИПФ, 2001, с. 96–101.
- [18] Ворожеева О.А., Ягодников Д.А. Математическая модель и расчетные исследования теплового состояния стенки камеры сгорания РДМТ на газообразном топливе кислород-метан в импульсном режиме работы. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2013, № 7, с. 11–20.

Статья поступила в редакцию 04.05.2021

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. 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>

**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](mailto: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](mailto:altkonst881@yandex.ru)

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

**Чигарев Марат Ренатович** — магистрант кафедры «Теплотехники и энергетического машиностроения», КНИТУ–КАИ им. А.Н. Туполева.  
e-mail: [chigarev\\_marat@mail.ru](mailto: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](mailto:alievprof@yandex.ru)

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

## Experimental study of electrostatic fields influencing thermal processes in gaseous methane at its natural convection

© V.A. Altunin<sup>1</sup>, K.V. Altunin<sup>1</sup>, M.R. Abdullin<sup>1</sup>, M.R. Chigarev<sup>1</sup>,  
I.N. Aliev<sup>2</sup>, M.L. Yanovskaya<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

<sup>3</sup>Central Institute of Aviation Motors, Moscow, 111116, Russia

*The paper shows the history of studying electrostatic fields in various gaseous media, including gaseous methane, and substantiates the necessity to experimentally study electrostatic fields influencing thermal processes in gaseous methane at its natural convection. We describe the experimental base and working areas with the use of electrostatic fields, as well as the method of conducting experimental research. The results of the influence of electrostatic fields on the coefficient of heat transfer to gaseous methane and on the negative process of sedimentation in it — during its natural convection are presented. In our research, we found zones of possible intensification of heat transfer to gaseous methane and zones of saturation with electrostatic fields, in which a further increase in the heat transfer coefficient is impossible. We experimentally established that the boundary of the zone of the beginning of saturation with electrostatic fields is also the beginning of the corona discharge zone. The research results formed the basis for the method of using electrostatic fields in aircraft engines and power plants.*

**Keywords:** gaseous methane, natural convection, heat transfer coefficient, sedimentation, electrostatic fields, electrostatic lines of force, working coaxial needles, zone of possible intensification of heat transfer, aircraft engines and power plants

### 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. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal — Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2012, vol. 85, no. 4, pp. 881–896.
- [2] 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.
- [3] Senftleben H., Braun W.Z. *Physik*, 1936, Bd. 102, S. 480–506.
- [4] Morar A.V. *Vliyaniye 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] Bolshakov G.F. *Fiziko-khimicheskie osnovy obrazovaniya osadkov v reaktivnykh toplivakh* [Physicochemical foundations of sedimentation in jet fuels]. Leningrad, Nauka Publ., 1982, pp. 147–154.
- [6] Altunin V.A., Altunin K.V., Aliev I.N., Abdullin M.R., Davlatov N.B., Platonov E.N., Yanovskaya M.L. *Teplovy protsessy v tekhnike — Thermal Processes in Engineering*, 2019, vol. 11, no. 10, pp. 453–479.

- [7] Popkov V.I. *Izv. AN SSSR. Energetika i transport (Proceedings of the USSR Academy of Sciences. Energy and transport)*, 1973, pp. 3–17.
- [8] Altunin V.A., Altunin K.V., Aliev I.N., et al. *Nekotorye puti povysheniya effektivnosti zhidkostnykh reaktivnykh dvigateley letatelnykh apparatov na uglevododorodnykh i azotosoderzhashchikh goryuchikh i okhladiteliakh* [Some ways to improve the efficiency of liquid-propellant jet engines of aircraft on hydrocarbon and nitrogen-containing fuels and refrigerants]. L.S. Yanovsky, ed. Kazan, Shkola Publ., 2020, 148 p.
- [9] Altunin V.A., Altunin K.V., Abdullin M.R., Platonov E.N., Yanovskaya M.L. *Voenmeh. Vestnik BGTU (Bulletin of BSTU Voenmeh)*, 2019, no. 55, pp. 419–424.
- [10] Altunin V.A., Altunin V.A., Abdullin M.R., Novikov S.N., Kokhanova Yu.S. *Issledovanie teplovykh protsessov v gazoobraznom metane* [Investigation of thermal processes in gaseous methane]. *Mater. dok. mezhdunar. nauchno-tekhnich. konf. «42-e Gagarinskije chteniya». (12–15 aprelya 2016 g.)* [Proceedings of the International Scientific and Technical Conference “42nd Gagarin Readings”. (April 12–15, 2016)]. Moscow, MAI Publ., 2016, pp. 657–658.
- [11] Altunin V.A., Abdullin M.R., Davlatov N.B., Shigapov R.R., Yanovskaya M.L. *Issledovanie vozmozhnosti intensivatsii teplootdachi k zhidkim i gazoobraznym uglevodородnym i azotosoderzhashchim goryuchim i okhladitel'nyam* [Investigation of the possibility of intensifying heat transfer to liquid and gaseous hydrocarbon and nitrogen-containing fuels and coolers]. *Sb. tez. dokl. Vserossiyskoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov «Aviatsionnye dvigateli i silovye ustanovki». FGUP «TsIAM im. P.I. Baranova», 28–30 maya 2019 g., Moskva* [Coll. abstracts and reports of the All-Russian Scientific and Technical Conference of Young Scientists and Specialists “Aircraft Engines and Power Plants”. FSUE CIAM, May 28–30, 2019, Moscow]. Moscow, CIAM Publ., 2019, pp. 316–317.
- [12] 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]. *Mater. 54 nauchnykh chteniy pamyati K.E. Tsiolkovskogo. Kaluga, GMIK, 17–19 sentyabrya 2019 g. RAN. RAKTs. Kaluga* [Materials of the 54th Scientific Readings in memory of K.E. Tsiolkovsky. Kaluga, State Museum of the History of Cosmonautics named after K.E. Tsiolkovsky, September 17–19, 2019. RAS. RACT]. Kaluga, AKF Polytop Publ., 2019, part 1, pp. 340–342.
- [13] Chernoschekov L.N. *AGZK+AT — Autogas filling complex+alternative fuel*, 2010, no. 2 (50), pp. 58–61.
- [14] Bakulin V.N., Breschenko E.M., Dubovkin N.F., Favorskiy O.N. *Gazovye topliva i ikh komponenty. Svoystva, poluchenie, primenenie, ekologiya* [Gas fuels and their components. Properties, production, application, ecology]. Moscow, MPEI Publ., 2009, 614 p.
- [15] Kovateva Yu.S., Vorobev A.G., Borovik I.N., Khokhlov A.N., Kazennov I.S. *Vestnik MAI — Aerospace MAI Journal*, 2011, vol. 18, no. 3, pp. 45–54.
- [16] Belov E.A., Bogushev V.Yu., Klepikov I.A., et al. *Rezultaty eksperimentalnykh rabot v NPO «Energomash» po osvoeniyu metana kak komponenta topliva dlya ZhRD* [The results of experimental work at NPO Energomash on the development of methane as a fuel component for a rocket engine]. *Trudy NPO «Energomash» im. akademika V.P. Glushko* [Proceedings of NPO Energomash], 2000, vol. XVIII, pp. 86–100.
- [17] Gorokhov V.D., Kunavin S.P. *Raboty KBKhA po sozdaniyu perspektivnykh ZhRD na komponentakh topliva kislorod-metan* [CADB's work on the creation of advanced liquid-propellant rocket engines using oxygen-methane fuel com-

ponents.]. *Nauchno-tekhnicheskiy sbornik KB Khimavtomatiki* [Scientific and technical collected papers of Chemical Automatics Design Bureau]. Voronezh, IPF Publ., 2001, pp. 96–101.

- [18] Vorozheeva O.A., Yagodnikov D.A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie — BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2013, no. 7, pp. 11–20.

**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 Engineering 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 Engineering and Power Engineering, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI. e-mail: mansur1392@mail.ru

**Chigarev M.R.**, Master's student of the Department of Heat Engineering 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.-Math.), Professor, Department of Technical Physics, Bauman Moscow State Technical University. 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