

Экспериментальное исследование тепловых процессов в газообразном метане при его естественной конвекции

© 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

Раскрыты причины перевода двигателей и энергоустановок одно- и многократного использования наземного, воздушного, аэрокосмического и космического базирования с жидких углеводородных горючих и охладителей на газовые горючие: на сжиженный природный газ — метан. Приведены примеры создания новой техники и перевода существующих агрегатов на метановое топливо и горючее. Перечислены классы метановых двигателей и энергоустановок, среди которых основными являются: поршневые двигатели и энергоустановки внутреннего сгорания, воздушно-реактивные двигатели и энергоустановки, жидкостные ракетные двигатели и энергоустановки. Обоснована необходимость экспериментального исследования газообразного метана для его эффективного применения в перспективных двигателях и энергоустановках наземного, воздушного, аэрокосмического и космического базирования одно- и многократного использования, а также для учета его особенностей при проектировании и создании новой техники. Представлены результаты экспериментального исследования тепловых процессов в газообразном метане при его естественной конвекции. Подробно раскрыты экспериментальная база и порядок проведения экспериментов. На основе результатов исследования разработаны методики расчета коэффициента теплоотдачи к газообразному метану.

Ключевые слова: газообразный метан, естественная конвекция, коэффициент теплоотдачи, осадкообразование, двигатели и энергоустановки летательных аппаратов, жидкостной ракетный двигатель

Введение. Ученые и специалисты утверждают, что природных запасов нефти в России осталось на 50 лет, а природного газа метана — на 200 лет [1–12]. В связи с этим Правительство Российской Федерации (далее — Правительство РФ) приняло ряд постановлений и распоряжений о переводе на газообразные топлива следующие отрасли промышленности и народного хозяйства:

- энергетика (Постановление Правительства РФ № 321 от 15 апреля 2014 «Развитие энергетики»);
- наземный транспорт (Распоряжение Правительства РФ №767-р от 13 мая 2013 «О регулировании отношений в сфере использования моторного топлива, в том числе природного газа в качестве моторного топлива»);

- авиационная промышленность (Постановление Правительства РФ № 303 от 15 апреля 2014 «Развитие авиационной промышленности на 2013–2025 годы»);

- космическая отрасль (Постановление Правительства РФ № 230 от 23 марта 2016 «Федеральная космическая программа России на 2016–2025 годы»).

Метановое топливо обладает высокими показателями:

- по энергетическим и тепловым параметрам при сжигании;
- экологическим параметрам вследствие его нетоксичности как перед сжиганием, так и после него;
- экономическим параметрам: метановое топливо — самое дешевое из жидких и газообразных углеводородных и других топлив.

Метан добывают:

- из газовых скважин;
- из нефтяных скважин;
- из каменного угля;
- из биогаза;
- путем конверсии жидких углеводородов.

Метановое топливо широко применяется в следующих видах оборудования:

- в поршневых двигателях внутреннего сгорания (ДВС);
- воздушно-реактивных двигателях (ВРД);
- газотурбинных двигателях (ГТД);
- жидкостных ракетных двигателях (ЖРД);
- энергоустановках (ЭУ) одно- и многофазового использования наземного, воздушного, аэрокосмического и космического базирования.

Конверсия метана применяется при создании высокотемпературных твердооксидных топливных элементов, используемых в наземной и авиационной технике [10]. Метан также широко применяется в других отраслях науки, техники и хозяйственной деятельности: в химической, медицинской, сельскохозяйственной и др.

Метановое топливо вошло в основные направления развития прорывных технологий в космической деятельности России до 2030 г. [1], в которых также раскрываются проблемы их разработки и внедрения. Метановое топливо широко применяется и в других развитых странах [2].

Особенности тепловых процессов в газообразном и сжиженном метане в условиях его естественной и вынужденной конвекции изучены и исследованы недостаточно полно. Нет единых и точных данных по теплоотдаче к метану, по осадкообразованию в нем. Теоретически решить эти вопросы невозможно, поэтому необходимо проводить экспериментальные исследования, результаты которых

будут являться надежным фундаментом для проектирования, создания и эксплуатации новой техники.

Цель настоящей статьи — показать результаты экспериментальных исследований особенностей тепловых процессов в газообразном метане при его естественной конвекции. В статье обоснована необходимость в проведении экспериментальных исследований. Показана экспериментальная база, раскрыта методика проведения экспериментов. Представлены и рассмотрены результаты исследования, разработаны новые методики расчета коэффициента теплоотдачи к газообразному метану в условиях его естественной конвекции.

Обоснование необходимости исследования газообразного метана. Русский ученый К.Э. Циолковский указывал, что для осуществления полетов в воздушной среде и в космосе можно применять различные жидкие и газообразные (болотные газы) углеводородные горючие [3–6].

Газообразные углеводородные горючие и охладители (УВГ и УВО) для летательных аппаратов (ЛА) и космических ЛА (КЛА) начали использовать позднее, чем жидкие УВГ и УВО. Так, в 1990-е годы в России практически по инициативе конструкторов и инженеров были закончены экспериментальные исследования возможности использования сжиженного природного газа (СПГ) метана на самолетах, где в качестве экспериментального образца использовался самолет Ту-154 с различными новыми двигателями и системами (эти модификации были названы Ту-155 и Ту-156). Самолет Ту-156 после более 100 успешных полетов показал возможность использования вместо керосина марки ТС-1 нового топлива — СПГ, о чем было доложено Правительству РФ. Но для серийного запуска нового отечественного самолета у исполнительного органа государственной власти тогда не нашлось 12,5 млн долл.

Более 20 лет в Республике Татарстан (РТ) [3–6] реализуется пилотный проект РФ по переводу дизельных базовых автомобильных и вспомогательных поршневых двигателей (КамАЗ) и судовых (река — море) поршневых и газотурбинных двигателей (ГТД) на газообразное топливо. Авиационные конверсионные и модернизированные ГТД марки НК (НК–16СТ, НК–18СТ и др.) уже давно переведены на газообразное топливо и широко применяются глобальной энергетической компанией «Газпром» на станциях газоперекачки.

В течение последних пяти лет создаются новые проекты самолетов, вертолетов и беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) с двигателями на метановом топливе [7–12]. Большую роль сыграл метан и в ракетно-космической науке и технике [11–21]. Уже несколько лет осуществляется совместный проект России и Индии по созданию космических ракет «Рикша», «Рикша-1» и «Рикша-2» с ЖРД и ЖРД многократного использования (ЖРДМИ) на СПГ. Корпорация по

космической деятельности «Роскосмос» в 2018 г. начала разработку нового ракетного двигателя на природном газе. Финансирование соответствующей разработки заложено в проекте Федеральной космической программы на 2016–2025 гг. (ФПК). На сегодняшний день в РФ создается новое семейство космических ракет одно- и многоразового использования «Амур» на метановых двигателях, которые придут на смену ракетам семейства «Союз-2». В ракете среднего класса «Амур-СПГ» будут использованы новые двигатели ЖРД и ЖРДМИ марки РД-0169, а в сверхтяжелой ракете «Амур-СПГ» — более мощные ЖРД и ЖРДМИ марки РД-182. Планируется, что ракеты этого типа будут использоваться при полетах на Луну в 2030 г. Известно, что в США начали разработку новой ракеты на топливе метан — кислород для полетов на Марс, а в Китае начали подобную разработку для полетов на Луну и Марс.

В ЦСКБ «Прогресс» посчитали, что использование двигателей на СПГ позволит значительно упростить наземную инфраструктуру и обеспечить следующие показатели:

- относительно низкую стоимость пуска — в 1,5–2 раза ниже, чем на керосиновых двигателях;
- высокую экологичность;
- более высокие удельные характеристики;
- единый тип двигателя;
- единый тип топливной пары СПГ + жидкий кислород.

Советник Генерального директора НПО «Энергомаш» В.К. Чванов в своих докладах и статьях [13] утверждал, что с конструкционной точки зрения метан привлекателен при создании многоразовых носителей. Чтобы освободить полости двигателя, необходимо только пройти цикл испарения, т. е. двигатель легче освобождается от остатков продуктов и практически в продуктах сгорания отсутствует сажа. Благодаря этому метановое топливо более приемлемо для создания двигателя многоразового использования и ЛА, КЛА одно- и многоразового применения. Необходимо отметить, что удельный импульс у двигателя на СПГ высокий, но это преимущество нивелируется следующим фактом: у метанового топлива меньшая плотность, поэтому в сумме получается лишь незначительное энергетическое преимущество.

В ряде других аэрокосмических КБ и НИИ РФ также проведены экспериментальные исследования на существующих, модернизированных и новых ЖРД и ЖРДМИ, в которых использовался СПГ. Отечественные ученые и разработчики также предлагают метановый двигатель к полетам на Марс и Луну: считается, что марсианскую ракету необходимо комплектовать метановым двигателем, так как метан можно синтезировать из воды и двуокиси углерода из атмосферы

Марса, а на Луне можно использовать большие запасы водяного льда для создания топливной пары метан — кислород.

Ведутся разработки по созданию не только новых базовых (маршевых) ЖРД и ЖРДМИ на метановом горючем, но и вспомогательных, например ЖРД малой тяги (ЖРДМТ) и ЖРДМТ многократного использования (ЖРДМТМИ). Предполагается, что новые ЖРДМТ и ЖРДМТМИ будут работать не только на СПГ, но и на газообразном метане.

Считается также перспективным направление по использованию метана, полученного при конверсии жидких УВГ и УВО. Эти исследования актуальны для разработки и создания новых двигателей и их систем охлаждения и, кроме того, для охлаждения теплонапряженных частей корпусов и деталей авиационных, аэрокосмических ЛА, КЛА и гиперзвуковых ЛА (ГЛА).

Переход на кислородно-метановое топливо обуславливается не только нарастающим дефицитом вырабатываемых из нефти топлив, но и большими запасами, доступностью и относительной дешевизной природного газа, а также экологическими преимуществами его применения. Однако тепловые процессы в метане (в сжиженном и газообразном состояниях) исследованы и изучены не в полном объеме, а расчетные формулы являются труднодоступными и неточными.

Например, значения теплофизических свойств (ТФС) метана в сжиженном и газообразном состояниях у многих авторов имеют расхождения, а их формулы расчета ТФС имеют различные формы и методы, и зачастую являются труднодоступными. Расчет ТФС метана по этим формулам дает различные результаты. Определение коэффициента теплоотдачи к метану через формулу Нуссельта при использовании значений ТФС ряда авторов приводит также к различным результатам.

Теплофизические свойства (плотность, теплопроводность, вязкость, изобарную теплоемкость) жидкого и газообразного метана исследовали, изучали и выводили для них расчетные формулы зарубежные и отечественные ученые: Д. Катц, Дж. Армстронг, Р. Лунн, Дж. Тимерманс, А. Мишельс, Ю. Миллер, Р. Олдс, Е. Мэсон, Е. Кардосо, Ю. Ласей, П. Хистерман, Н. Томпсон, Р. Волд, Дж. Бломгрэн, Р. Пэск, Е. Касе, Ю. Манн, Н. Джонстон, Дж. Ламберт, Н. Зенфтлебен, Дж. Байрон, Дж. Росс, И.Ф. Голубев, В.А. Петров, А.Н. Мещеряков, Е.А. Столяров, В.И. Кудашев, С.Ф. Герф, Г.И. Галков, Н.С. Руденко, Л.В. Шубников, Н.В. Павлович, Д.Л. Тамрот, Н.В. Цедерберг, Н.К. Елухин, В.Г. Фастовский, А.В. Фрост, А.А. Петрущенко, Б.Я. Максимук, Г.Т. Левченко, О.А. Добровольский и др. [22].

Отсутствуют экспериментальные данные по теплоотдаче к метану при его сжиженном и газообразном состояниях, а также единая информация по осадкообразованию в метане. Теоретически эти процессы исследовать, изучить и рассчитать невозможно. Поэтому необ-

ходимо создавать экспериментальную базу и проводить всесторонние экспериментальные исследования, в первую очередь, с газообразным метаном в условиях его естественной конвекции.

Экспериментальная база для исследования газообразного метана при его естественной конвекции. Для проектирования, разработки, создания и эксплуатации новых метановых поршневых и реактивных двигателей и энергоустановок необходимы всесторонние технические и технологические сведения о газообразных углеводородных горючих и их смесях. Исследование особенностей тепловых процессов, происходящих в системах топливоподачи и охлаждения перспективных двигателей и энергоустановок, а также создание базы экспериментальных данных особенностей тепловых процессов в газообразных углеводородных горючих и их теплофизических и термодинамических свойств, необходимых для эффективного проектирования, является актуальным и необходимым.

Для расширения знаний об особенностях тепловых процессов в газообразном метане были созданы экспериментальная установка и рабочие участки по естественной конвекции газообразного метана.

Для проведения исследований особенностей теплоотдачи к газообразному метану была создана экспериментальная установка (рис. 1). Она состоит из батареи баллонов высокого давления 1, редуктора 2, датчиков давления 3, 6, вентиля 4, экспериментальной бомбы 5, запорного вентиля 7 и выходного канала 8.

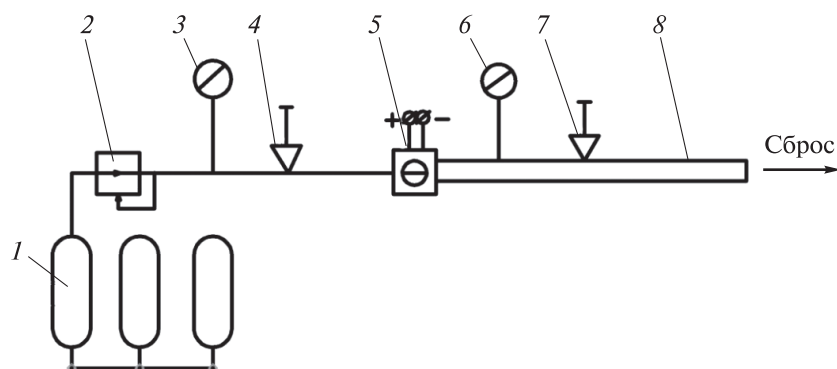


Рис. 1. Схема экспериментальной установки по исследованию газообразного метана в условиях его естественной конвекции

Схема экспериментальной бомбы приведена на рис. 2, а. Она состоит из корпуса 3; двух окон визуализации 1, 14, изготовленных из прочного органического стекла; входного штуцера 2; прижимной крышки 4; полости 15, в которой находится закаченная порция исследуемого газообразного метана; крышки 8 с резиновым уплотнителем 9 и прижимным механическим кольцом 5; прижимных винтов 7;

двух медных токовводов 10 с изоляционными прокладками 6. К нижним концам токовводов монтируется рабочий участок 11, 12, 13. Общий вид экспериментальной бомбы показан на рис. 2, б.

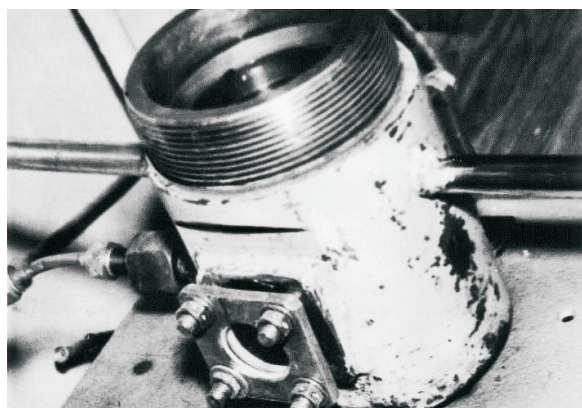
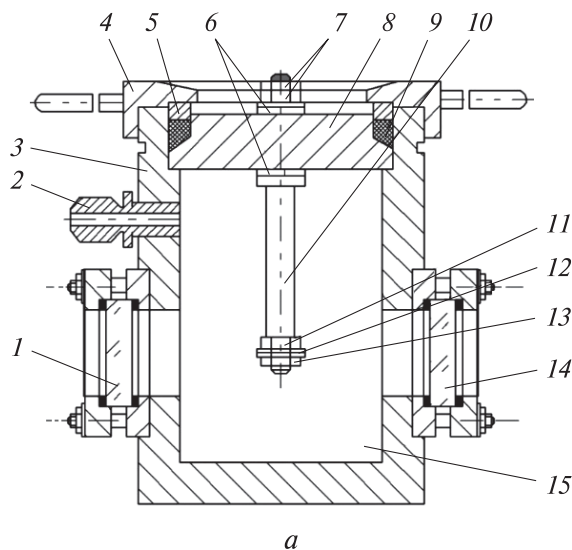


Рис. 2. Экспериментальная бомба:

а — схема экспериментальной бомбы для исследований газообразного метана в условиях его естественной конвекции; *б* — общий вид экспериментальной бомбы (со снятой крышкой)

Рабочий участок по исследованию газообразного метана в условиях его естественной конвекции, представленный на рис. 3, состоит:

- из крышки 4 с вмонтированными в нее через изоляционные прокладки двумя медными токовводами 3;
- системы контроля за подаваемым напряжением 6, 7;
- системы подачи регулируемого напряжения 8, 9;
- системы замера температуры рабочей пластины 1;

- приваренной к рабочей пластине 1 хромель-алюмелевой термопары 2;
 - датчика температуры (потенциометра) рабочей пластины 5.
- К сменным элементам относятся:
- рабочая пластина 1, изготовленная из нержавеющей стали марки 1X18H9T размерами $(50 \times 2 \times 0,2) \cdot 10^{-3}$ м, закрепленная в нижней части токовводов 3;
 - термопара 2, изготовленная из хромель-алюмелевых проволок диаметром $(0,08 \cdot 10^{-3})$ м, приваренная к центру рабочей пластины 1 и выведенная через электро- и гидроизоляционные каналы и прокладки в крышке 4 к потенциометру 5.

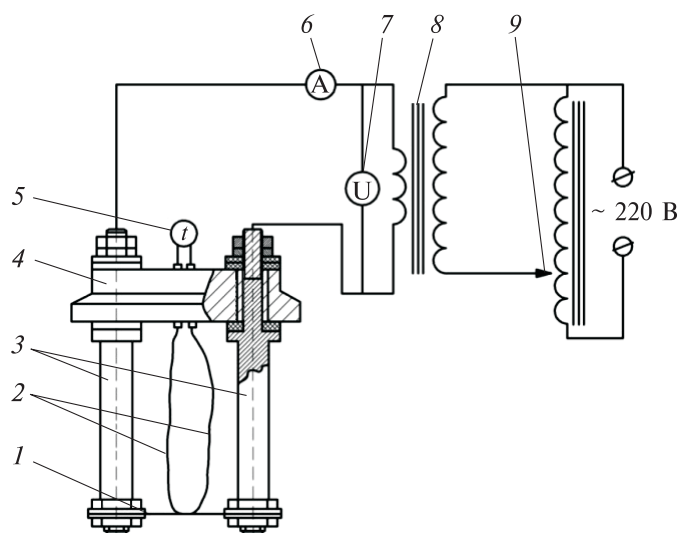


Рис. 3. Схема рабочего участка со сменной рабочей пластиной

Данная экспериментальная установка позволяет проводить исследования с газообразным метаном при его давлении 7,0 МПа и различных температурах, а также при различных нагревах джоулевой теплотой съемных и сменных рабочих пластин. Достоверность измерений обеспечивалась точностью используемых приборов и количеством повторяемых экспериментов.

Методика проведения экспериментальных исследований. Каждый эксперимент состоял из этапов подготовки и проведения (см. рис. 1–3).

Этап подготовки. В рабочий участок устанавливалась и закреплялась рабочая пластина с приваренной термопарой, концы которой проводились через электро- и гидроизоляционные каналы в запорной крышке и подсоединялись к потенциометру. Рабочий участок размещался внутри экспериментальной бомбы, на которую устанавлива-

лись уплотнительные (резиновое и металлическое) кольца, плотно до упора закручивалась крышка. Далее закрывался выпускной вентиль, порция газообразного метана заправлялась в полость бомбы, закрывался впускной вентиль и заносилось в рабочий журнал конкретное рабочее давление в бомбе.

Этап проведения. Проводился джоулев нагрев рабочей пластины путем подачи на нее напряжения. Значения напряжения, силы тока и температуры снимались с приборов и фиксировались (заносились в рабочий журнал). Каждый эксперимент длился 10 мин.

После каждого эксперимента отключалось электропитание рабочего участка, открывался выпускной вентиль с продувкой бомбы воздухом, отворачивалась запорная крышка, вынимались уплотнительные кольца и рабочий участок. Рабочая пластина откручивалась от рабочего участка и отправлялась на дальнейшее обследование (на наличие осадкообразования).

Следующий эксперимент проводился с новой рабочей пластиной при ее большем нагреве и таком же давлении в бомбе. После серии экспериментов при фиксированном давлении были проведены другие серии экспериментов с более высокими фиксированными давлениями.

Дополнительные опыты (по исследованию процесса осадкообразования) проводились в течение 60 мин и более.

Результаты экспериментальных исследований. В ходе экспериментов было обнаружено следующее:

- при любых рабочих давлениях газообразного метана увеличение плотности теплового потока q пластины приводит к повышению температуры ее стенки $T_{ст}$ (рис. 4) и коэффициента теплоотдачи α (рис. 5);
- увеличение давления в рабочей бомбе, т. е. при постоянном объеме и при изохорном процессе, приводит к понижению температуры греющей стенки (рабочей пластины) $T_{ст}$ (см. рис. 4) и к повышению α (см. рис. 5).

Например, при температуре метана $T_r = 273$ К, давлении $p = 1,8$ МПа и плотности теплового потока $q = 24 \cdot 10^4$ Вт/(м² · К) температура стенки $T_{ст}$ рабочей пластины составляет 902,92 К (кривая голубого цвета на рис. 4), при давлении $p = 7,0$ МПа температура рабочей пластины понизилась до $T_{ст} = 723,03$ К (кривая фиолетового цвета на рис. 4), т. е. в среднем на 180°, что составляет 24,88 %.

При этих же условиях (см. рис. 5) увеличение давления от 1,8 МПа (кривая голубого цвета на рис. 5) до 7,0 МПа (кривая фиолетового цвета на рис. 5) приводит к увеличению коэффициента теплоотдачи α на 141,41 Вт/(м² · К), т. е. на 38,3 %.

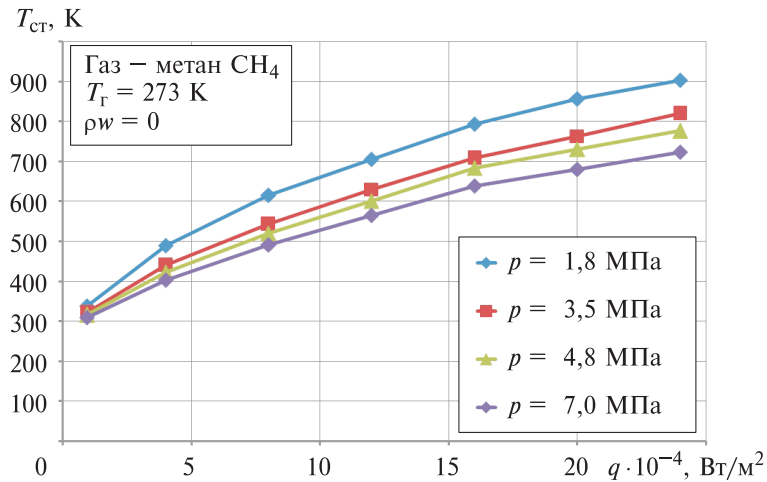


Рис. 4. Зависимость температуры стенки рабочей пластины от плотности теплового потока при различных давлениях метана при его естественной конвекции

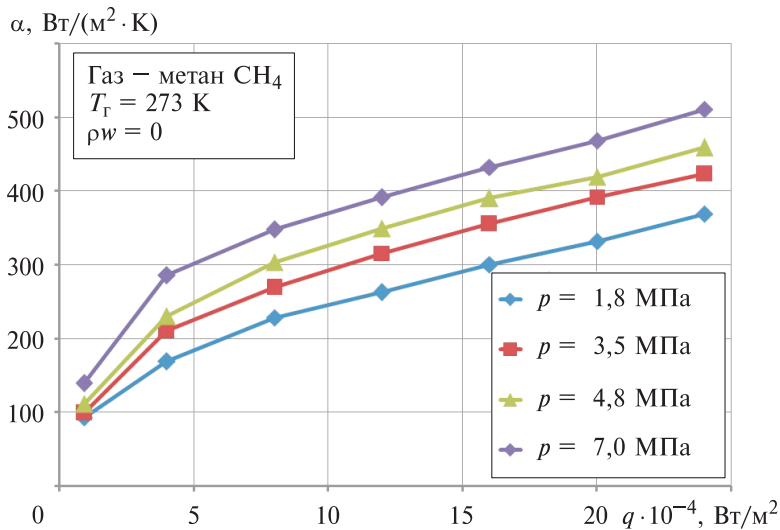


Рис. 5. Зависимость коэффициента теплоотдачи к газообразному метану в условиях естественной конвекции от плотности теплового потока и давления

Можно предположить, что давление интенсифицирует процесс теплоотдачи к газообразному метану в условиях его естественной конвекции, т. е. увеличивает α . Подобные результаты были получены в работах В.В. Сычева, А.А. Вассермана, Б.С. Петухова [23, 24] и других ученых, в которых исследовался метан и другие газообразные УВГ и УВО.

Для увеличения теплоотдачи к газообразному метану достаточно в условиях его естественной конвекции и при постоянном объеме повышать давление и, соответственно, плотность теплового потока, а при постоянных значениях q — увеличивать только p .

Осмотр рабочих пластин показал, что за 10 мин работы установки на различных режимах по давлению и температуре поверхности рабочих пластин оставались чистыми, т. е. без слоя углеродистого осадка δ_{oc} .

Дальнейшие опыты выявили, что осадок отсутствует на поверхности рабочей пластины и через час непрерывной работы установки.

Экспериментально обнаружено [3–6], что начало образования светло-серого осадка рыхлой структуры в газообразном метане при его естественной конвекции в замкнутом объеме экспериментальной бомбы происходит при $p > 0,1$ МПа и $T_{ст} \geq 550$ К.

Увеличение давления в бомбе способствовало появлению δ_{oc} более плотной структуры такого же светло-серого цвета. Дальнейшее увеличение $T_{ст}$ способствовало некоторому увеличению толщины δ_{oc} . Однако необходимо заметить, что δ_{oc} в метане имеет более рыхлую структуру, скорость процесса δ_{oc} в десять раз меньше, чем в жидких УВГ и УВО.

Ранее авторами [25] было обнаружено, что интенсивность осадкообразования в газообразном метане происходит при давлении более 0,1 МПа и $T_{ст} = 750 \dots 1275$ К, заметное влияние δ_{oc} на α отмечено при $T_{ст} > 1000$ К, так как при этих температурах формируется твердый углеродистый слой осадка.

Дополнительные опыты авторов настоящей статьи по непрерывному нагреву пластины в течение нескольких часов при высоких температурах 1000...1100 К подтвердили результаты этих ученых. Как и в ранних опытах авторов настоящей статьи с жидкими УВГ и УВО [4, 6, 26–30], осадок быстрее появлялся на металлических поверхностях с естественной шероховатостью, чем на полированных. Установлено, что толщина δ_{oc} не превышала глубины искусственной шероховатости в виде конической резьбы (накаток, кольцевания и др.). Другие виды искусственных углублений заполнялись осадком в первую очередь.

Проведенные экспериментальные исследования в условиях естественной конвекции газообразного метана при различных давлениях и температурах позволили авторам настоящей статьи получить новые и уточненные результаты влияния давления и плотности теплового потока на увеличение коэффициента теплоотдачи к газообразному метану, а также и на осадкообразование.

Установлено:

1) при температуре более 800 К на нагреваемых поверхностях каналов образуется углеродистый осадок δ_{oc} светло-серого цвета и очень рыхлой структуры, а при температуре более 1000 К осадок появляется в виде твердого слоя;

2) скорость образования осадка в метане в 10 раз меньше скорости осадкообразования в жидких УВГ и УВО, например, в ТС-1 и др.

На основе фундаментальных исследований создан банк экспериментальных данных, который включает:

- сведения о значениях коэффициента теплоотдачи к газообразному метану в условиях его естественной конвекции при различных давлениях и температурах;
- сведения о методиках расчета коэффициента теплоотдачи к газообразному метану, числа Нуссельта, числа Рэлея и др.;
- рекомендации по применению результатов исследования при расчете, проектировании, создании и эксплуатации перспективных двигателей и энергоустановок различного применения и базирования.

Методики расчета коэффициента теплоотдачи к газообразному метану в условиях его естественной конвекции. Расчет коэффициента теплоотдачи к газообразному метану α , по мнению различных авторов [12, 22–25], является довольно затруднительным и неточным. Поэтому была разработана методика расчета α , основанная на экспериментальных исследованиях, которую можно применять при инженерных и теоретических расчетах.

В условиях естественной конвекции газообразного метана:

$$\alpha = f(T_r, T_{ст}, q, p, X),$$

где T_r — начальная температура газа; $T_{ст}$ — температура нагреваемой поверхности (рабочего участка, пластины); q — плотность теплового потока; p — давление в системе (в экспериментальной бомбе); X — химико-физические и технические свойства газа.

Газообразный метан необходимо считать чистым, без различных примесей, а также без допуска кислорода (воздуха). Наличие последнего компонента может привести к непредсказуемым последствиям с возникновением взрыва и пожара экспериментальной установки.

В условиях естественной конвекции $rw = 0$ можно предложить следующую экспериментальную зависимость, по которой α определяется с точностью $\pm 10...12\%$:

$$\alpha = \frac{q_0}{T_0} \left[\sqrt{\frac{q}{q_0}} \sqrt{\frac{p}{p_0}} \left(\frac{1}{\sqrt[3]{\frac{q - q_0}{q_0}}} \right) \right]; \quad (1)$$

$$q_0 = 1 \text{ Вт/м}^2;$$

$$T_0 = 1 \text{ К Вт/м}^2;$$

$$p_0 = 1,0 \text{ МПа.}$$

Здесь q — текущее значение плотности теплового потока; p — текущее значение давления в экспериментальной бомбе, МПа.

Для более точного расчета α (с точностью $\pm 2...3\%$) можно предложить экспериментальную формулу

$$\alpha = 100 \cdot \left\{ \frac{q_0}{T_0} \left[\sqrt{\frac{q}{q_0}} \sqrt{\frac{p}{p_0}} \left(\frac{1}{\sqrt[3]{\frac{q - q_0}{q_0}}} \right) \right] \right\} \operatorname{tg} x \quad (2)$$

Значения $\operatorname{tg} x$ в формуле (2) находят из экспериментальной таблицы.

Значения показателя степени для формулы (2)

| $q, \text{Вт/м}^2$ | $p, \text{МПа}$ | | | |
|----------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| | 1,0–2,0 | 2,0–4,0 | 4,0–5,0 | 5,0–7,0 |
| $(1-4) \cdot 10^4$ | $\operatorname{tg}6 = 0,11$ | $\operatorname{tg}8,5 = 0,15$ | $\operatorname{tg}9,5 = 0,17$ | $\operatorname{tg}12,5 = 0,22$ |
| $(4-8) \cdot 10^4$ | $\operatorname{tg}8,5 = 0,15$ | $\operatorname{tg}11 = 0,19$ | $\operatorname{tg}11,5 = 0,2$ | $\operatorname{tg}12,5 = 0,22$ |
| $(8-12) \cdot 10^4$ | $\operatorname{tg}11 = 0,19$ | $\operatorname{tg}12 = 0,21$ | $\operatorname{tg}12,5 = 0,22$ | $\operatorname{tg}13 = 0,23$ |
| $(12-16) \cdot 10^4$ | $\operatorname{tg}11,5 = 0,2$ | $\operatorname{tg}12,5 = 0,22$ | $\operatorname{tg}13 = 0,23$ | $\operatorname{tg}14 = 0,25$ |
| $(16-20) \cdot 10^4$ | $\operatorname{tg}11,5 = 0,2$ | $\operatorname{tg}12,5 = 0,22$ | $\operatorname{tg}13 = 0,23$ | $\operatorname{tg}14 = 0,25$ |
| $(20-24) \cdot 10^4$ | $\operatorname{tg}11,5 = 0,2$ | $\operatorname{tg}12,5 = 0,22$ | $\operatorname{tg}13 = 0,23$ | $\operatorname{tg}14 = 0,25$ |

Для расчета тепловых процессов в газообразном метане разработана и предложена экспериментальная формула, с помощью которой можно вычислить значения Nu_0 для рабочих параметров по давлению $p = (0,1...7,0)$ МПа, по плотностям теплового потока $q = (4...24) \cdot 10^4$ Вт/м², по значениям произведения чисел $Gr \cdot Pr = 6770...226\,785$ с точностью $0,5...13\%$:

$$Nu_0 = (Gr \cdot Pr)_m^{0,22}, \quad (3)$$

где метан находится в газообразном состоянии.

На граничной линии метан находится в смешанном состоянии (жидкость — газ (пар)), в области ниже ее (см. рис. 6) — в сжиженном состоянии, поэтому расчеты тепловых процессов в указанных местах и состояниях следует проводить уже по другим формулам.

Дальнейшие поиски различных способов увеличения коэффициента теплоотдачи α привели авторов к исследованию тепловых процессов в газообразном метане с помощью электростатических полей (E), что подробно будет освещено и показано в следующей статье электронного научно-технического издания «Инженерный журнал: наука и инновации».

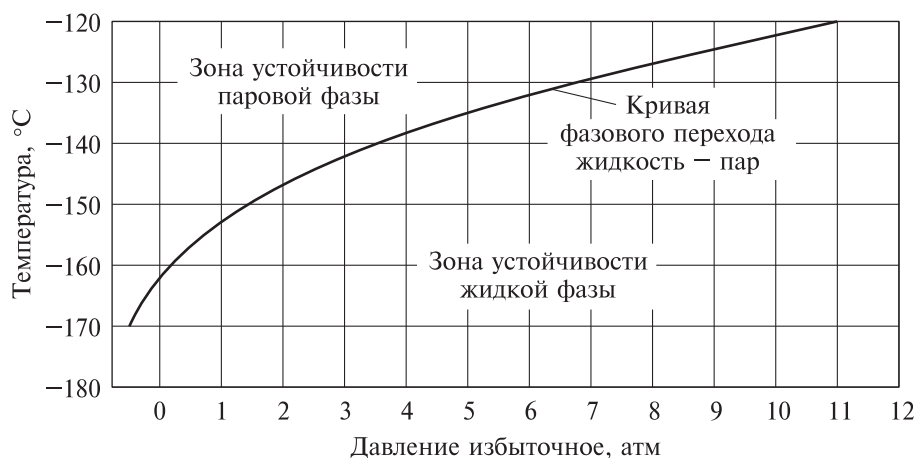


Рис. 6. Зависимость температуры кипения жидкого метана от давления

Заключение. Проведены экспериментальные исследования тепловых процессов в газообразном метане в условиях его естественной конвекции. На основе полученных экспериментальных данных:

- создана база экспериментальных данных по теплоотдаче к газообразному метану и по негативному процессу осадкообразования;
- разработаны новые методики расчета коэффициента теплоотдачи к газообразному метану при рабочих параметрах по давлению и температуре в условиях его естественной конвекции.

Данные результаты станут основой для дальнейших исследований газообразного метана в условиях его вынужденной конвекции.

Перспективными также являются эксперименты по влиянию электростатических полей (E) на тепловые процессы в газообразном метане в условиях его естественной и вынужденной конвекции.

Применение результатов исследований позволит проектировать, создавать и эксплуатировать новые инновационные двигатели и энергоустановки одно- и многоразового использования наземного, воздушного, аэрокосмического и космического базирования повышенных характеристик по ресурсу, надежности, эффективности, экономичности и экологичности.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Гапоненко О.В. Основные направления развития прорывных технологий в космической деятельности России и проблемы их разработки и внедрения. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 6.
DOI: 10.18698/2308-6033-2019-6-1893
- [2] *NASA Strategic Technology Investment Plan*. NASA, Office of the Chief Technologist, 2017.
URL: https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/2017-8-1_stip_final-508ed.pdf (дата обращения 24.05.2018).

- [3] Алтунин В.А., Алтунин К.В., Абдуллин М.Р., Яновская М.Л. Создание экспериментальной базы для расчета двигателей и энергоустановок наземного, воздушного, аэрокосмического и космического базирования на газообразном метане. *Тр. 53-х Науч. чтений, посвященных памяти К.Э. Циолковского. Калуга, 18–19 сентября 2018, РАН, РАКЦ.* Казань, Изд-во Казанского университета, 2019, с. 146–159.
- [4] 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.
- [5] Алтунин В.А., Алтунин К.В., Абдуллин М.Р., Яновская М.Л. Анализ результатов экспериментальных исследований газообразного метана в условиях его естественной конвекции. *Матер. 54-х Науч. чтений памяти К.Э. Циолковского. Калуга, 17–19 сентября 2019, ГМИК, РАН, РАКЦ.* Калуга, Политоп, 2019, ч. 1, с. 340–342.
- [6] 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».* Москва, 28–30 мая 2019, ЦИАМ им. П.И. Баранова. Москва, Изд-во ЦИАМ им. П.И. Баранова, 2019, с. 316–317.
- [7] Чернощев Л.Н. Природный газ метан — топливо будущего. *АГЗК+АТ*, 2010, № 2 (50), с. 58–61.
- [8] Телегина Е., Чоловский А. Автомобиль на метане — совсем не утопия. *Мировая энергетика*, 2006, № 4 (28), с. 75–77.
- [9] Глушич Д.В., Горбачев А.С., Баймухаметов С.К., Пономарев А.А., Симинько И.А., Капралов Д.А. Шахтный метан — топливо для газопоршневой электростанции. *Турбины и дизели*, 2012, № 1, с. 44–47.
- [10] Собянин В.А. Высокотемпературные твердооксидные топливные элементы и конверсия метана. *Российский химический журнал*, 2003, т. 47, № 6, с. 62–70.
- [11] Ришес К. Болотный газ прорывается в космос. *Наука и техника*, 2018, № 1 (140), с. 10–12.
- [12] Бакулин В.Н., Брещенко Е.М., Дубовкин Н.Ф., Фаворский О.Н. *Газовые топлива и их компоненты. Свойства, получение, применение, экология.* Москва, Издательский дом МЭИ, 2009, 614 с.
- [13] Белов Е.А., Богушев В.Ю., Клепиков И.А., Смирнов А.М. Результаты экспериментальных работ в НПО «Энергомаш» по освоению метана как компонента топлива для ЖРД. В сб.: *Труды НПО «Энергомаш» им. академика В.П. Глушко.* Королев, 2000, т. XVIII, с. 86–100.
- [14] 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.
- [15] Ягодников Д.А., Антонов Ю.В., Ворожеева О.А., Масальский Н.Л., Новиков А.О., Чертков К.О. Экспериментальное исследование рабочего процесса в газогенераторе кислород-метанового ракетного двигателя. *Инженерный вестник*, 2014, № 10, с. 19–39.
- [16] 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.

- [17] Новиков А.В., Ягодников Д.А., Буркальцев В.А., Лапицкий В.И. Математическая модель и расчет характеристик рабочего процесса в камере сгорания ЖРД малой тяги на компонентах топлива метан — кислород. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2004, спец. вып., с. 8–17.
- [18] Кочанов А.В., Клименко А.Г. Исследования проблем создания ракетных двигателей малой тяги на экологически чистых газообразных топливах. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2006, № 3, с. 15–30.
- [19] 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.
- [20] Снигерев Б.А., Тукмаков А.Л., Тонконог В.Г. Исследование вскипающего течения жидкого метана в сопле Лавала. *Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы — 2015: Материалы Междунар. науч.-техн. конф. «ИМТОМ-2015», Казань, 2–4 декабря 2015. Ч. 1. Казань, Фолиант, 2015, с. 180–183.*
- [21] Шарипов Ш.Г., Усманов Р.Р., Романенков П.Г. Детектор метана для беспилотного авиационного комплекса. *Газовая промышленность*, 2018, спец. вып. 3 (773), с. 134–136.
- [22] Загорученко В.А., Журавлев А.М. *Теплофизические свойства газообразного и жидкого метана*. Москва, Изд-во Комитета стандартов, мер и измерительных приборов при Совете министров СССР, 1969, 237 с.
- [23] Сычев В.В., Вассерман А.А. *Термодинамические свойства метана*. Москва, Наука, 1979, с. 8–36.
- [24] Петухов Б.С. *Вопросы теплообмена*. Москва, Наука, 1987, 280 с.
- [25] Афшар Р., Когли А., Саксен С. Теплопроводность метана при атмосферном давлении в интервале температур (360...1275) К. *Теплопередача*, 1980, т. 102, № 1, с. 186–191.
- [26] Алтунин В.А., Алтунин К.В., Алтунин В.А., Гортышов Ю.Ф., Дресвянников Ф.Н., Тарасевич С.Э., Гуреев В.М., Попов И.А., Губин С.Д. *Способ предотвращения образования и роста углеродистых отложений на стенках теплообменных каналов*. Пат. на изобретение № 2482413 Российская Федерация, 2013, бюл. № 14, 6 с.
- [27] Алтунин В.А., Алтунин К.В., Платонов Е.Н., Обухова Л.А., Яновская М.Л. Особенности тепловых процессов в жидких углеводородных горючих и охладителях в существующих и перспективных двигателях и энергоустановках наземного, воздушного, аэрокосмического и космического применения. *Сб. тез. докл. Всероссийской научно-технической конференции «Авиадвигатели XXI века», посвященной 85-летию ЦИАМ им. П.И. Баранова. Москва, 24–27 ноября 2015, ЦИАМ. Москва, Изд-во ЦИАМ, 2015, с. 969–971.*
- [28] Алтунин К.В., Новиков С.Н., Платонов Е.Н., Обухова Л.А., 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. *Матер. докл. 51-х Научных чтений РАН, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К.Э. Циолковского. «Идеи К.Э. Циолковского в инновациях науки и техники»*. Калуга, 20–22 сентября 2016, ЦИАМ. Калуга, Изд-во «Наша Полиграфия», 2016, с. 104–105.
- [29] Алтунин В.А., Алтунин К.В., Алиев И.Н., Платонов Е.Н., Коханова С.Я., Яновская М.Л. Разработка способов борьбы с термоакустическими автоколебаниями давления в топливно-охлаждающих каналах двигателей и энер-

гоустановок летательных аппаратов наземного, воздушного, аэрокосмического и космического применения. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2017, № 10 (691), с. 77–90.

- [30] Яновский Л.С., ред. *Некоторые пути повышения эффективности жидкостных реактивных двигателей летательных аппаратов на углеводородных и азотосодержащих горючих и охладителях*. Казань, Изд-во «Школа», 2020, 148 с.

Статья поступила в редакцию 22.04.2021

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Алтуний В.А., Алтуний 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/10.18698/2308-6033-2020-5-2080>

Алтуний 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

Алтуний 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

Experimental study of thermal processes in gaseous methane at its natural convection

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

The paper discovers the reasons for the transfer of single-use or reusable ground, air, aerospace, and space-based engines and power plants from liquid hydrocarbon fuels and coolers to gaseous fuels, or rather, to liquefied natural gas methane. The study gives specific examples of creating a new technology and using methane fuel and fuel in the existing units; lists the classes of methane engines and power plants, among which the main ones being piston engines and internal combustion power plants, air-jet engines and power plants, liquid propellant rocket engines and power plants. Findings of research show that it is necessary to experimentally study gaseous methane, so that it could be effectively used in advanced single-use or reusable ground, air, aerospace and space-based engines and power plants, and their features should be taken into account when designing and developing new technologies. The study introduces the results of the experimental study of thermal processes in gaseous methane during its natural convection, describes the experimental base in detail, as well as the procedure for conducting experiments, and develops methods for calculating the heat transfer coefficient to gaseous methane relying on the research results.

Keywords: gaseous methane, natural convection, heat transfer coefficient, sedimentation, engines and power plants of aircraft, liquid-propellant rocket engine

REFERENCES

- [1] Gaponenko O.V. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2019, iss. 6 (1). DOI: 10.18698/2308-6033-2019-6-1893
- [2] *NASA Strategic Technology Investment Plan*. NASA, Office of the Chief Technologist, 2017. Available at: https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/2017-8-1_stip_final-508ed.pdf (accessed May 24, 2018).
- [3] Altunin V.A., Altunin K.V., Abdullin M.R., Yanovskaya M.L. Sozdanie eksperimentalnoy bazy dlya rascheta dvigateley i energoustanovok nazemnogo, vozdušnogo, aerokosmicheskogo i kosmicheskogo bazirovaniya na gazoobraznom metane [Creation of an experimental base for calculating engines and power plants of ground, air, aerospace and space-based on gaseous methane]. *Tr. 53 Nauchnykh chteniy, posvyashchennykh pamyati K.E. Tsiolkovskogo. Kaluga, 18–19 sentyabrya 2018 g., RAN, RAKTs, Kazan* [Proceedings of the 53rd Scientific Readings dedicated to the memory of K.E. Tsiolkovsky. Kaluga, September 18–19, 2018, RAS, RACT]. Kazan, Kazan University Publ., 2019, pp. 146–159.
- [4] 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.

- [5] 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.* [Proceedings of the 54th Scientific Readings in memory of K.E. Tsiolkovsky. Kaluga, State Museum of the History of Cosmonautics named after K.E. Tsiolkovsky, Kaluga, September 17–19, 2019, RAS, RACT]. Kaluga, AKF Polytop Publ., 2019, part 1, pp. 340–342.
- [6] Altunin V.A., Abdullin M.R., Davlatov N.B., Shigapov R.R., Yanovskaya M.L. Issledovanie vozmozhnosti intensivifikatsii teplootdachi k zhidkim i gazoobraznym uglevodorodnym i azotosoderzhashchim goryuchim i okhladiteliam [Investigation of the possibility of intensifying heat transfer to liquid and gaseous hydrocarbon and nitrogen-containing fuels and coolers]. *Sb. tez. dokl. Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov «Aviatsionnye dvigateli i silovye ustanovki» FGUP «TsIAM im. P.I. Baranova», 28–30 maia 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.
- [7] Chernoschekov L.N. *AGZK+AT (Automotive refueling complex + alternative fuel)*, 2010, no. 2 (50), pp. 58–61.
- [8] Telegina E., Cholovskiy A. *Mirovaya energetika (The world energy)*, 2006, no. 4 (28), pp. 75–77.
- [9] Glushich D.V., Gorbachev A.S., Baymukhametov S.K., Ponomarev A.A., Simin’ko I.A., Kapralov D.A. *Turbiny i dizeli — Turbines & Diesels*, 2012, no. 1, pp. 44–47.
- [10] Sobyenin V.A. *Rossiyskiy khimicheskii zhurnal (Russian Journal of General Chemistry)*, 2003, vol. 47, no. 6, pp. 62–70.
- [11] Rishes K. *Nauka i tekhnika (Science and technology)*, 2018, no. 1 (140), pp. 10–12.
- [12] 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.
- [13] Belov E.A., Bogushev V.Yu., Klepikov I.A., Smirnov A.M. 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]. In: *Trudy NPO «Energomash» im. akademika V.P. Glushko* [Proceedings of NPO Energomash]. Korolyov, 2000, vol. XVIII, pp. 86–100.
- [14] 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 components]. In: *Nauchno-tekhnicheskii sbornik KB Khimavtomatiki* [Scientific and technical collected papers of Chemical Automatics Design Bureau]. Voronezh, IPF Publ., 2001, pp. 96–101.
- [15] Yagodnikov D.A., Antonov Yu.V., Vorozheeva O.A., Masalskiy N.L., Novikov A.O., Chertkov K.O. *Inzhenerny vestnik — Engineering Bulletin*, 2014, no. 10, pp. 19–39.
- [16] Kovateva Hu.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.
- [17] Novikov A.V., Yagodnikov D.A., Burkaltsev V.A., Lapitskiy V.I. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie — Herald of the Bauman Mos-*

- cow State Technical University. *Series Mechanical Engineering*, 2004, spec. iss., pp. 8–17.
- [18] Kochanov A.V., Klimenko A.G. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2006, no. 3, pp. 15–30.
- [19] Vorozheeva O.A., Yagodnikov D.A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie — BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2013, no. 7, pp. 11–20.
- [20] Snigerev B.A., Tukmakov A.L., Tonkonog V.G. Issledovanie vskipyushego techeniya zhidkogo metana v sope Lavalya [Study of the boiling flow of liquid methane in a Laval nozzle]. In: *Innovatsionnye mashinostroitelnye tekhnologii, oborudovanie i materialy–2015: materialy mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. “IMTOM-2015”, 2–4 dek. 2015, ch. 1* [Innovative Engineering Technologies, Equipment and Materials–2015: Materials of the International Scientific and Technical conf. “IMTOM-2015”, 2–4 December, 2015, part 1]. Kazan, Foliant Publ., 2015, pp. 180–183.
- [21] Sharipov Sh.G., Usmanov R.R., Romanenkov P.G. *Gazovaya promyshlennost — Gas Industry of Russia*, 2018, spec. iss. 3 (773), pp. 134–136.
- [22] Zagoruchenko V.A., Zhuravlev A.M. *Teplofizicheskiye svoystva gazoobraznogo i zhidkogo metana* [Thermophysical properties of gaseous and liquid methane]. Moscow, Publishing House of the Committee of Standards, Measures and Measuring Instruments under the Council of Ministers of the USSR, 1969, 237 p.
- [23] Sychev V.V., Vasserman A.A. *Termodinamicheskiye svoystva metana* [Thermodynamic properties of methane]. Moscow, Nauka Publ., 1979, pp. 8–36.
- [24] Petukhov B.S. *Voprosy teploobmena* [Heat transfer issues]. Moscow, Nauka Publ., 1987, 280 p.
- [25] Afshar R., Kogli A., Saksen S. *Teploperedacha — Journal of heat transfer*, 1980, vol. 102, no. 1, pp. 186–191.
- [26] Altunin K.V., Altunin V.A., Gortyshe Ju.F., Dresvjannikov F.N., Gureev V.M., Tarasevich S.E., Popov I.A., Gubin S.D. *Method to prevent formation and growth of carbonaceous deposits on walls of heat exchange channels*. Patent for invention no. RU 2482413. Publ. 2013, bull. no. 14, 6 p.
- [27] Altunin V.A., Altunin K.V., Platonov E.N., Obukhova L.A., Yanovskaya M.L. Osobnosti teplovykh protsessov v zhidkikh uglevodorodnykh goryuchikh i okhladitelyakh v sushchestvuyushchikh i perspektivnykh dvigatelyakh i energoustanovkakh nazemnogo, vozdušnogo, aerokosmicheskogo i kosmicheskogo primeneniya [Features of thermal processes in liquid hydrocarbon fuels and coolants in existing and future engines and power plants for ground, air, aerospace and space applications]. In: *Sb. tez. dokl. Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Aviadvigateli XXI veka», posvyashchennoy 85-letiyu TSIAM im. P.I. Baranova. Moskva, 24–27 noyabrya 2015, TSIAM* [Sat. thesis. report All-Russian scientific and technical conference “Aircraft engines of the XXI century”, dedicated to the 85th anniversary of TsIAM named after P.I. Baranov. Moscow, November 24–27, 2015, CIAM]. Moscow, TSIAM Publ., 2015, pp. 969–971.
- [28] Altunin K.V., Novikov S.N., Platonov E.N., Obukhova L.A., Shiganov R.R., Yanovskaya M.L. Vliyaniye teplovykh protsessov v uglevodorodnykh goryuchikh i okhladitelyakh na sovershenstvovaniye konstruktivnykh skhem forsunok i kanalov dvigateley i energoustanovok letatel'nykh apparatov [Influence of thermal processes in hydrocarbon fuels and coolants on the improvement of design schemes of nozzles and channels of engines and power plants of aircraft]. In: *Mater. dokl. 51-kh nauchnykh chteniy RAN, posvyashchennykh razrabotke nauchnogo naslediya i razvitiyu idey*

- K.E. Tsiolkovskogo. «Idei K.E. Tsiolkovskogo v innovatsiyakh nauki i tekhniki». Kaluga, 20–22 sentyabrya 2016, TSIAM [Reports of the 51st Scientific readings of the Russian Academy of Sciences, dedicated to the development of the scientific heritage and the development of the ideas of K.E. Tsiolkovsky. “The ideas of K.E. Tsiolkovsky in innovations of science and technology”, Kaluga, September 20–22, 2016, CIAM]. Kaluga, Nasha Poligrafiya Publ., 2016, pp. 104–105.*
- [29] Altunin V.A., Altunin K.V., Aliev I.N., 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.
- [30] Yanovsky L.S., ed. *Nekotoryye puti povysheniya effektivnosti zhidkostnykh reaktivnykh dvigateley letatel'nykh apparatov na uglevodorodnykh i azotosoderzhashchikh goryuchikh i okhladitelyakh* [Some ways of increasing the efficiency of liquid-propellant jet engines of aircraft using hydrocarbon and nitrogen-containing fuels and refrigerants]. Kazan', Shkola Publ., 2020, 148 p.

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