

Авиационная и ракетно-космическая техника

УДК 536+537

DOI 10.18698/0536-1044-2017-10-77-90

Разработка способов борьбы с термоакустическими автоколебаниями давления в топливно-охлаждающих каналах двигателей и энергоустановок летательных аппаратов наземного, воздушного, аэрокосмического и космического применения

В.А. Алтунин¹, К.В. Алтунин¹, И.Н. Алиев², Е.Н. Платонов¹,
С.Я. Коханова¹, М.Л. Яновская³

¹ КНИТУ им. А.Н. Туполева — КАИ, 420111, Казань, Российская Федерация, ул. К. Маркса, д. 10

² МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

³ ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова», 111116, Москва, Российская Федерация, Авиамоторная ул., д. 2

Developing Ways to Combat Thermal Acoustic Self-Oscillations of Pressure in Fuel Cooling Channels of Engines and Power Plants of Flight Vehicles of Land, Air, Aerospace and Space Application

V.A. Altunin¹, K.V. Altunin¹, I.N. Aliev², E.N. Platonov¹, S.Y. Kokhanova¹,
M.L. Yanovskaya³

¹ Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI, 420111, Kazan, Russian Federation, K. Marx St., Bldg. 10

² BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1

³ Federal State Unitary Enterprise — Baranov Central Institute of Aviation Motors CIAM, 111116, Moscow, Russian Federation, Aviamotornaya St., 2

@ e-mail: altspacevi@yahoo.com

i Рассмотрены особенности тепловых процессов, происходящих в топливных и охлаждающих каналах двигателей, энергоустановок и техносистем одно- и многократного использования на жидких углеводородных горючих и охладителях. Подробно раскрыты позитивные и негативные процессы, вызванные термоакустическими автоколебаниями давления. На основе результатов экспериментальных исследований разработаны новые методы и способы борьбы с термоакустическими автоколебаниями давления в каналах рубашек охлаждения жидкостных ракетных двигателей одно- и многократного использования, а также в других энергоустановках и техносистемах наземного, воздушного, аэрокосмического и космического базирования, применяемых в наземном транспорте при добыче тяжелых нефтей, в летательных аппаратах,

космических летательных аппаратах, воздушно-космических самолетах и на орбитальных космических станциях.

Ключевые слова: жидкие углеводородные горючие, термоакустические автоколебания давления, процесс осадкообразования, электростатические поля, процесс теплоотдачи, каналы рубашки охлаждения

i This article examines specific features of the thermal processes, which take place in cooling and fuel channels of engines, power plants and technical systems of expendable and non-expendable use, working on liquid hydrocarbon fuels and coolants. The positive and negative processes caused by thermo-acoustic self-oscillations of pressure are detailed. Based on the results of experimental research, new ways and methods to combat thermo-acoustic self-oscillations of pressure in the channels of cooling jackets of expendable and non-expendable liquid rocket engines are developed. These methods can also be used in land-, air- and space-based power plants and technical systems that are used in land transport, heavy oil extraction, flight vehicles, space flight vehicles, aerospace planes and orbital space stations.

Keywords: liquid hydrocarbon fuel, thermal acoustic self-oscillations of pressure, process of sediment formation, electrostatic fields, process of heat emission, channels of cooling jacket

При работе жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) многоразового использования (ЖРДМИ) в каналах их рубашек охлаждения (РО) происходят различные аномальные позитивные и негативные тепловые процессы, так как жидкие углеводородные горючие (УВГ) и охладители (УВО) находятся в сложных термодинамических условиях, связанных с вынужденной конвекцией, критическими и сверхкритическими давлениями и температурами.

Например, в зоне критических давлений $p_{кр}$ для жидких УВГ (УВО) марки РГ-1 ($p_{кр} = 1,8...2,4$ МПа) происходит аномальный позитивный процесс увеличения коэффициента теплоотдачи α в 2–3 раза вследствие особенностей теплофизических свойств этих УВГ (УВО).

При температуре до 40 °С (313 К) жидкие УВГ (УВО) представляют собой диэлектрики. При дальнейшем ее повышении они становятся электропроводными средами, так как в них появляются положительно и отрицательно заряженные частички. При нагреве жидких УВГ (УВО) до температуры более 100 °С (373 К) в них образуются диполи, которые активно участвуют в осадкообразовании. Последнее является аномальным негативным и очень опасным процессом, так как через 1...3 мин после запуска ЖРД (ЖРДМИ) внутренние стенки каналов РО покрываются слоем твердого углеродистого осадка (ТУО). Вследствие этого происходит неожиданный несанкционированный и быстрый нагрев стенок РО с их дальнейшим перегревом, прогаром, пожаром и взрывом.

Кроме того, частичное закоксовывание топливно-охлаждающих каналов и форсунок ЖРДМИ вызывает частичную потерю тяги, необходимость увеличения времени работы и числа запусков ЖРДМИ (для достижения необходимого импульса тяги и выполнения запланированного или внепланового маневра космического летательного аппарата (КЛА) или орбитальной космической станции (ОКС)), что влечет за собой повышение расхода бортовых запасов УВГ (УВО) и окислителя. Полное закоксовывание становится причиной полной потери тяги, аварийных ситуаций, связанных с образованием течи УВГ (УВО), пожара и взрыва, а также невыполнения полетных заданий.

В воздушно-реактивных двигателях (ВРД), газотурбинных двигателях (ГТД), других энергоустановках (ЭУ) и техносистемах (ТС) одно- и многоразового использования (ЭУМИ, ТСМИ) различного назначения, базирования и применения негативный процесс осадкообразования способствует частичному и полному закоксовыванию топливных каналов, фильтров и форсунок. Частичное закоксовывание одной форсунки приводит к нерасчетному струйному распылу с дальнейшим прогаром жаровой трубы, пожару и взрыву, частичное закоксовывание нескольких форсунок — к частичной потере тяги, а полное закоксовывание — к полной потере тяги, образованию течи в системе топливоподдачи, пожару и взрыву. Кроме того, ТУО на деталях системы управления двигателем вызывает их заедание и заклинивание с дальней-

шей неуправляемостью, разносом двигателя и аварией всего летательного аппарата (ЛА).

Аномальным процессом также являются термоакустические автоколебания (ТААК) давления, способствующие:

- увеличению коэффициента теплоотдачи α на 40 % (это позитивный процесс);
- появлению локально чередующихся зон перегрева (например, в области критического сечения сопла ЖРД, ЖРДМИ) с дальнейшим прогаром РО, взрывом двигателя и всего ЛА или КЛА (это негативный процесс);
- циклическому процессу откалывания ТУО в каналах РО (это позитивный процесс, так как он содействует автоматической очистке каналов РО при работе двигателя в земных и космических условиях, например, на стенде испытаний и исследований, при добыче тяжелых нефтей в наземных условиях, на орбите и при маневрах в космосе). Данный эффект включен В.А. Алтуниным в классификацию борьбы с осадкообразованием как перспективный способ удаления углеродистого осадка без съема двигателя с ЛА, КЛА и без его разборки. Однако при этом происходит засорение топливно-охлаждающих каналов, фильтров и форсунок с дальнейшими негативными последствиями (это негативный процесс), т. е. ТААК давления можно считать негативно-позитивным аномальным процессом.

В данной статье рассмотрены вопросы, связанные с ТААК давления в каналах с жидкими УВГ (УВО), которые остаются до конца неисследованными. Разработчики современных и перспективных ЖРД и ЖРДМИ очень мало внимания уделяют позитивным и негативным особенностям тепловых процессов, происходящих в топливно-охлаждающих каналах с жидкими УВГ (УВО), или вообще не рассматривают [1–3].

Результаты анализа научно-технической и патентно-лицензионной литературы. Обоснование необходимости проведения экспериментальных исследований. Анализ научно-технической и патентно-лицензионной литературы показал следующее.

1. Научными исследованиями возникновения ТААК давления в каналах с различными жидкостями занимались многие ученые [3–16], такие как Н.И. Антонюк, В.А. Герлига, В.Р. Скалозубов, Ш.Г. Каплан, Р.Е. Толчинская, В.Е. Накоряков, А.П. Бурдуков, Б.Г. Покусаев,

И.Р. Шрейбер, А.М. Кичигин, Л.А. Кесова, Е.И. Несис, Н.Л. Кафенгауз, Л.С. Яновский, В.М. Ерошенко, В.И. Лубановский, Л.А. Яскин, Б.М. Дорофеев, А.Т. Сеницын, В.А. Ассман, В.А. Хмара, В.И. Манкеев, В.И. Войцеховский, В.И. Ветров, В.Н. Шамин и др. В то же время лишь ограниченное число ученых [3, 4, 13–15, 17, 18] изучали этот процесс в каналах с жидкими УВГ (УВО) при сложных термодинамических условиях (при до- и сверхкритических давлениях и температурах), характерных для реальных ЖРД и других ЭУ и ТС.

2. До сих пор нет единства во взглядах на механизм и прочие особенности этого аномального явления. Наиболее правильное и достоверное описание и обоснование ТААК давления сделала группа ученых во главе с Н.Л. Кафенгаузом [5–10]. Они раскрыли механизм этого явления, связав его с появлением в пограничном слое паровых пузырьков и псевдопузырьков, с большой разницей температур между ядром потока и пристеночной областью, с турбулентным забросом холодной жидкости в паровую пристеночную область и др. Также они считают, что при теплообмене в каналах возникают резонансные колебания давления с узлами на границах канала. Поскольку скорость звука изменяется по длине канала в зависимости от температуры, варьируется и набор частот, а максимальная температура стенки (минимум коэффициента теплоотдачи) соответствует пучности волны давления. Поэтому длина волны для данного коэффициента теплоотдачи соответствует половине длины волны давления. Локальные перегревы, чередующиеся с менее нагретыми участками (из-за узлов и пучностей стоячей акустической волны в обогреваемом акустическом контуре с жидким охладителем), показаны на рис. 1. Эти режимы очень опасны, так как могут

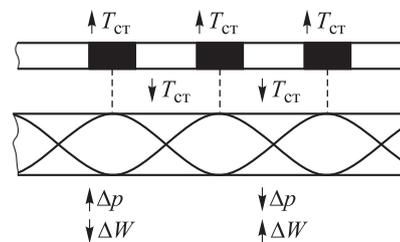


Рис. 1. Зависимость локальных перегревов рабочей трубки с жидким охладителем от узлов и пучностей стоячей акустической волны при ТААК давления:

$T_{ст}$ — температура стенки рабочей трубки;

Δp — изменение акустического давления;

ΔW — изменение скорости прокачки охладителя

привести к прогару, пожару и взрыву ЖРД, ЖРДМИ, ЭУ, ЭУМИ, ТС и ТСМИ в земных и космических условиях.

3. В качестве закрытого акустического обогреваемого («горячего») контура (ГК) в основном использовались цельнотянутые тонкостенные трубки из нержавеющей стали с наружным диаметром 3...5 мм и длиной до 100 мм. Отсутствуют данные о том, какое воздействие оказывает увеличение длины акустического ГК на параметры возникновения ТААК давления, интенсификацию теплоотдачи и негативный процесс осадкообразования. До сих пор неизвестно, как влияют на ТААК давления и осадкообразование дополнительный акустический необогреваемый («холодный») контур (ХК) разной длины и предварительный нагрев УВГ (УВО). Нет сведений о зависимости ТААК давления от рабочих параметров (давления p , скорости прокачки УВГ (УВО) и др.), а также о применении электростатических полей (E) и их влиянии на процессы возникновения и поддержания ТААК давления в каналах с разными жидкими УВГ (УВО), а также с их смесями.

4. При проектировании, расчете и создании новой техники конструкторы и разработчики мало внимания уделяют (или вообще не уделяют) позитивным и негативным аномальным процессам, происходящим в жидких УВГ (УВО) [1–3, 17–20].

5. Очень трудно, опасно и малоэффективно бороться с негативными аномальными процессами в ходе эксплуатации двигателей, ЭУМИ, ТСМИ наземного и воздушного базирования на жидких УВГ (УВО), что связано с остановкой эксплуатации ЛА, снятием двигателя и отправкой его на завод для капитального ремонта, с дальнейшей разборкой, очисткой от ТУО различными методами и способами (в том числе и с помощью ТААК давления), которые не следует путать с вибрационными и акустическими методами. В космосе же провести подобные мероприятия для КЛА практически невозможно.

6. Существующий способ удаления ТУО с использованием ТААК давления, разработанный авторами [10], можно применять только в заводских условиях при разборке ВРД и ГТД, в каких-либо отсоединенных трубках (топливных каналах) при их закреплении на стенде и заполнении водой или специальным моющим раствором с дальнейшим подключением аппаратуры для формирования ТААК давления.

7. Всестороннюю борьбу с осадкообразованием и ТААК давления необходимо начинать уже на стадии проектирования, расчета и создания двигателей, ЭУМИ и ТСМИ [3, 4, 17, 18].

8. Сведений о влиянии ТААК давления на работу двигателей, ЭУМИ и ТСМИ очень мало, теоретически изучить этот аномальный процесс практически невозможно. Поэтому необходимы фундаментальные и всесторонние научные экспериментальные исследования, чтобы на их основе разрабатывать новые методы уничтожения этого негативного аномального процесса как на стадии его зарождения, так и в ходе его жизненного цикла (в целях надежной защиты от возникновения локально чередующихся зон перегрева и прогара РО, пожара и взрыва), а также новые способы искусственного зарождения, роста и существования ТААК давления (для обеспечения автоматического удаления ТУО из каналов РО без разборки и ремонта двигателя, что особенно важно, например, в космических условиях) [3, 4, 17, 18].

Цель работы — на основе результатов экспериментальных исследований разработать способы борьбы с ТААК давления в топливно-охлаждающих каналах двигателей и энергоустановок ЛА наземного, воздушного, аэрокосмического и космического применения.

Создание экспериментальной базы по исследованию ТААК давления. Для всестороннего и глубокого исследования особенностей ТААК давления в РО ЖРДМИ создана экспериментальная установка по вынужденной конвекции жидких УВГ (УВО) и рабочие участки (РУ). Экспериментальная установка обеспечивала воспроизведение условий охлаждения и осадкообразования в трактах ВРД, ЖРД и других ЭУМИ, ТСМИ по гидродинамическим, тепловым и геометрическим параметрам. В качестве жидких УВГ (УВО) использовали керосин ТС-1 и нафтил РГ-1. Вся информация о ТААК давления поступала в акустический измерительный комплекс. Выверку акустических датчиков осуществляли с помощью эталонной акустической камеры.

Для исследования особенностей теплоотдачи созданы РУ, представляющие собой обогреваемые джоулевым теплом трубки из нержавеющей стали марки 1Х18Н10Т разной длины с внутренними и наружными диаметрами, равными соответственно 1,86 и 3,00 мм. Длина ГК составляла 65 и 130 мм, ХК — до 1 400 мм.

ТААК давления фиксировались наружным микрофоном марки МК-201 и несколькими датчиками марки ЛХ-610, которые в ГК устанавливались на входе и выходе, а в гибридных контурах (ГиК), состоящих из ХК и ГК, — на середине трубки. Управление осуществлялось с помощью дистанционного пульта. Для создания электростатических полей применяли прибор марки АФ-3 и РУ типа игла-игла.

Основные исследования проводили при начальной температуре жидкого УВГ (УВО) $T_{ж} = 293$ К. Для дополнительных опытов с подогретой жидкостью использовали специальный участок, позволяющий подогревать охладитель до необходимой температуры (вплоть до температуры насыщения) при до- и сверхкритических давлениях непосредственно перед его поступлением в ГК и ГиК.

Результаты экспериментальных исследований без влияния Е. Результаты экспериментальных исследований с ГК при начальной температуре нафтила РГ-1 ($T_{ж} = 293$ К) показали, что при возрастании массовой скорости прокачки ρw с $10 \cdot 10^3$ до $20 \cdot 10^3$ кг/(м²·с) существуют общие и отличительные особенности зависимости температуры РУ со стороны жидкости (внутренней стенки) $T_{ст}$ от плотности теплового потока q .

К общим особенностям относятся:

- тенденция роста $T_{ст}$ при повышении q ;
- возникновение звукового сопровождения (свиста), т. е. ТААК давления, при определенных значениях рабочих параметров ($T_{ст}$, p , ρw), начало которых отмечено на графиках знаком «+», что для примера показано на рис. 2;
- появление режимов улучшенной теплоотдачи, когда с увеличением q температура $T_{ст}$ не изменялась или даже понижалась.

Отличительными особенностями являются:

- увеличение $T_{ст}$ в зависимости от q при различных значениях ρw ;
- начальные значения параметров ($T_{ст}$, p , ρw), при которых возникают ТААК давления;
- параметры, при которых происходит «замораживание» $T_{ст}$ (образование «полочек») или уменьшение $T_{ст}$ с дальнейшим его возрастанием (с появлением «впадин»), т. е. параметры улучшенной теплоотдачи;
- нарушение нормального (логически упорядоченного) роста $T_{ст}$ при повышении q , p и ρw .

Аналогичные особенности зависимости температуры $T_{ст}$ от плотности теплового потока q и массовой скорости прокачки охладителя ρw

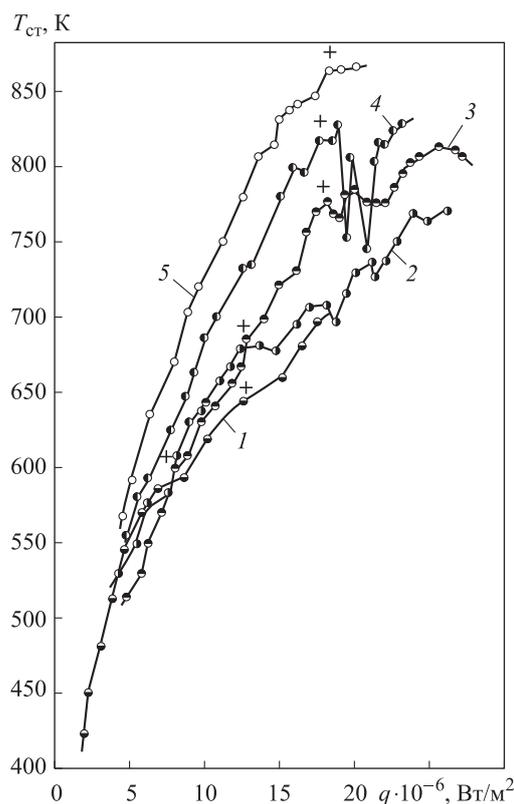


Рис. 2. Зависимость температуры $T_{ст}$ от плотности теплового потока q при массовой скорости прокачки нафтила без подогрева $\rho w = 10 \cdot 10^3$ кг/(м²·с) и различных значениях давления: 1 — $p = 2,5$ МПа; 2 — $p = 5,0$ МПа; 3 — $p = 7,5$ МПа; 4 — $p = 10,0$ МПа; 5 — $p = 12,5$ МПа

при $T_{ж} = 293$ К и различных фиксированных до- и сверхкритических давлениях получены и в опытах с керосином ТС-1. Эксперименты с ГК длиной 65 мм показали, что при возникновении и поддержании ТААК давления коэффициент теплоотдачи α в среднем увеличивался на 40 %, а амплитуда колебаний A фиксировалась только на какой-то одной частоте f при любых режимных параметрах (рис. 3). Дальнейшие исследования РУ (ГК) длиной 130 мм подтвердили ранее обнаруженные эффекты. При этом установлено, что для возникновения и поддержания ТААК давления достаточно создать гораздо меньшую плотность теплового потока q .

Опыты с предварительным подогревом жидкого УВГ (УВО) показали, что повышение температуры жидкости способствует увеличению времени начала ТААК давления, а холодная жидкость — более раннему и эффективно-му возникновению ТААК давления с наибольшей и устойчивой амплитудой. Также выявлено, что повышение массовой скорости

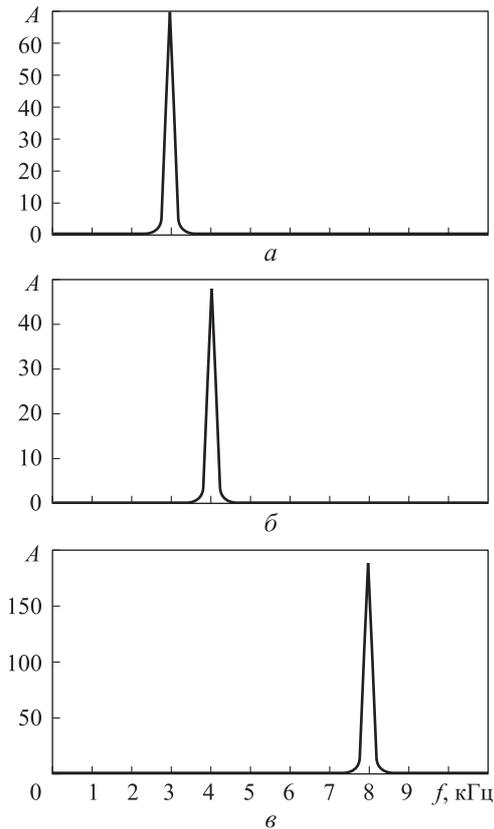


Рис. 3. Результаты экспериментальных исследований ТААК давления при длине ГК $L_{ГК} = 65$ мм и различных рабочих параметрах (УВГ — керосин ТС-1):

- a* — $T_{ст} = 703$ К; $p = 5,25$ МПа; $\rho w = 3,21 \cdot 10^3$ кг/(м²·с);
б — $T_{ст} = 673$ К; $p = 5,00$ МПа; $\rho w = 3,95 \cdot 10^3$ кг/(м²·с);
в — $T_{ст} = 833$ К; $p = 5,50$ МПа; $\rho w = 16,45 \cdot 10^3$ кг/(м²·с)

прокачки ρw в 2 раза требует увеличения плотности теплового потока q примерно в 3 раза (для обеспечения возникновения и поддержания ТААК давления).

При повышенной плотности теплового потока q обнаружен эффект равноудаленных локальных увеличений температуры стенки $T_{ст}$ до покраснения (см. рис. 1). Ранее с этим столкнулись в своих опытах Н.Л. Кафенгауз и его ученики, в работах которых [5–10] показано, что покраснение трубки (увеличение $T_{ст}$) происходит при максимальной амплитуде в пучностях стоячей волны вследствие возрастания акустического давления Δp и уменьшения скорости охладителя ΔW .

В местах канала с минимальной амплитудой A , где образуются узлы, наоборот, снижается Δp и увеличивается ΔW , что ведет к уменьшению $T_{ст}$. Этот комплексный процесс очень опасен, так как может вызвать прогар стенки, пожар и взрыв ЖРД, ЖРДМИ, ЭУ, ЭУМИ, ТС, ТСМИ,

ЛА, КЛА, как уже указывалось ранее. Параллельно с описанными явлениями в генераторе акустических колебаний (в ГК) происходит процесс осадкообразования, способствующий быстрому самопроизвольному росту $T_{ст}$ с негативными последствиями. Прогар может наступить в любом месте канала, но в первую очередь именно в областях расположения пучностей (в случае установившейся стоячей волны с одной модой).

Из анализа литературы [3–18] известно, что главную роль в ТААК давления играют пузыри при докритических давлениях и псевдопузыри при критических и сверхкритических давлениях (процесс зарождения на греющей стенке, рост, отрыв от поверхности к ядру потока и «схлопывание»). Эксперименты показали, что пузыри и псевдопузыри участвуют не только в интенсификации теплоотдачи и возникновении ТААК давления, но и в процессе удаления ТУО.

Так, на рис. 4 показан процесс осадкообразования в виде прироста температуры стенки $\Delta T_{ст}$ в зависимости от времени t (массовая скорость прокачки керосина ТС-1 $\rho w = 10 \cdot 10^3$ кг/(м²·с), $p = 4,25$ МПа), а также процесс откалывания осадка в виде резкого падения этой же температуры при отсутствии (кривая 1) и наличии (кривая 2) ТААК давления.

Характерная цикличность процесса (см. рис. 4, кривая 2) может являться своеобразным сигналом о возникновении двухфазного потока в канале с твердыми частичками углеродистого осадка. Это необходимо учитывать при расчете тепловых процессов, проектировании и создании систем контроля, топливоподачи и охлаждения ЖРД, ЖРДМИ, ЭУ, ЭУМИ, ТС, ТСМИ различного назначения и базирования. Кроме того, эта цикличность может стать сигналом на включение (далее по потоку) систем фильтра-

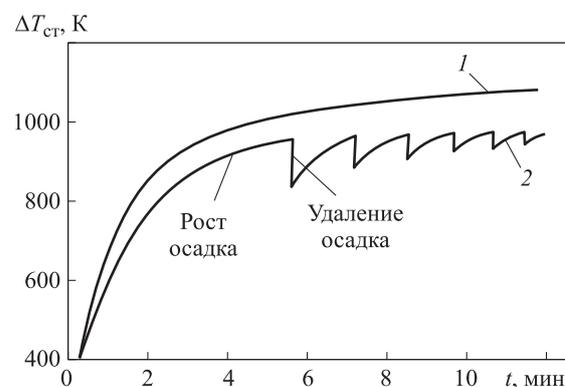


Рис. 4. Процесс осадкообразования на стенке ГК при отсутствии (1) и наличии (2) ТААК давления

ции и очистки. Особенно это важно для сбережения энергоресурсов в космических ЖРДМИ, ЭУМИ и ТСМИ, где процесс осадкообразования идет активно, а ТААК давления способны появиться при возникновении малой или микрогравитации (при смене и корректировке орбиты, ориентации при стыковке и в других подобных случаях).

Эксперименты с ГиК, имеющим общую длину 700 мм с ГК длиной 65 мм, показали, что происходит задержка времени начала ТААК давления. Увеличение длины генератора звуковых колебаний, т. е. увеличение длины ГК, до 130 мм привело к более раннему образованию термодинамических условий возникновения ТААК давления.

Выявлена одна общая закономерность: наличие дополнительного ХК способствует росту числа мод (до $N = 15$) с уменьшением амплитуды A , где каждая мода имеет следующие значения: $f_1 = 1$ кГц, $f_2 = 2$ кГц, $f_3 = 3$ кГц и т. д., что показано на рис. 5 (УВГ — керосин ТС-1; $W = 4,6$ м/с; $p = 5,6$ МПа; $T_{ст} = 703$ К). Следует отметить, что удлинение ХК (до общей длины 1 400 мм) особых изменений не внесло. Параллельно с описанными явлениями в генераторе акустических колебаний (в ГК) происходит процесс осадкообразования.

Для ГиК установлено следующее:

- увеличение массовой скорости прокачки ρw приводит к уменьшению числа мод N колебаний, повышению плотности теплового потока q (для возникновения ТААК давления) и установлению стоячих волн при любых значениях q ;
- процесс образования осадка и его удаления происходит только в ГК;
- скорость звука в ядре потока ГК и в ХК является одинаковой;

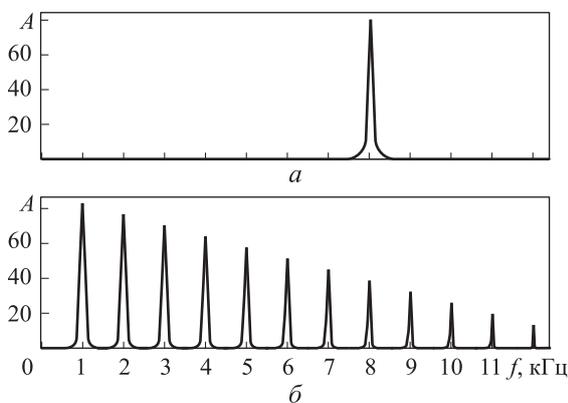


Рис. 5. Результаты исследования ТААК давления в ГК (а) и ГиК (б)

- внутренний диаметр ХК должен быть акустически открытым, т. е. таким же, как у ГК или больше;

- длина ХК должна в 5 раз превышать длину ГК.

Одно из замечательных свойств ГиК — одновременно образовывать несколько мод колебаний во всем акустическом контуре — приводит к «размазыванию» областей установления пучностей, т. е. в «горячем» участке контура не нужно прогнозировать и ожидать локальных перегревов и прогаров стенки из-за ТААК давления.

Подобные исследования были проведены и с нафтилом. Результаты, полученные для керосина и нафтила, совпали, так как ТС-1 и РГ-1 — это углеводородные жидкости, отнесенные по своим свойствам и теории соответственных состояний к одному (первому) классу.

Результаты экспериментальных исследований при влиянии E . Опыты показали, что E разрушают пузыри и тепловые свили (при докритических давлениях), а также псевдопузыри и псевдосвилы (при критических и сверхкритических давлениях), т. е. E предотвращают зарождение и существование ТААК давления, но только до скорости прокачки жидкого УВГ (УВО) менее 6 м/с, что показано на рис. 6.

Кроме того, E влияют на предотвращение образования ТУО в зоне прохождения силовых линий. По результатам исследований создан банк данных рабочих параметров (таблицы, графики), при которых возникали ТААК давления без влияния E и с влиянием E .

Разработка способов борьбы с ТААК давлением. На базе результатов основных (с жидкими УВГ (УВО)) и дополнительных (с газообразным метаном и воздухом) экспериментальных ис-

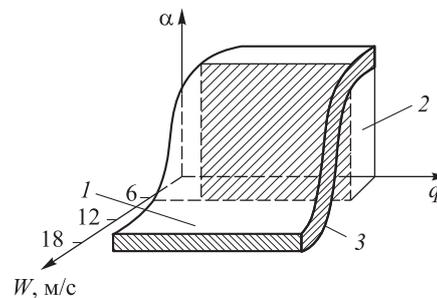


Рис. 6. Область существования ТААК давления в жидких УВГ и УВО без влияния E и с влиянием E :
1 и 3 — конец и начало ТААК давления;
2 — область влияния E

следований разработаны новые методы и способы борьбы с ТААК давления для различных двигателей (включая ЖРД и ЖРДМИ), ЭУ, ЭУМИ, ТС и ТСМИ. Их можно подразделить на следующие группы: **активные** (или оперативные) — при участии в данном процессе человека (наземного оператора, летчика, космонавта) для включения в работу (в случае необходимости и контроля) дополнительных способов защиты в ручном, полуавтоматическом и автоматическом режимах; **пассивные** — без участия человека, когда способы борьбы заложены еще в ходе проектирования, расчета и создания двигателей, ЭУ, ЭУМИ, ТС и ТСМИ; **активно-пассивные** — одновременное осуществление активной и пассивной борьбы.

При проектировании новых двигателей, ЭУ и ТС разработчики и конструкторы должны провести предварительную проверку возможности возникновения ТААК давления в РО с жидкими УВГ (УВО).

Зная вид (марку) жидкого УВГ (УВО), его теплофизические свойства и другие характеристики, а также технологические параметры его эксплуатации: скорость прокачки, плотность теплового потока, давление в системе, геометрию (длину, внутренний диаметр, качество обработки поверхности, наличие и форму искусственных интенсификаторов теплоотдачи) топливно-охлаждающего канала, температуру греющей (охлаждаемой) стенки (или рабочей трубки, канала и т. д.), необходимо войти в область существования ТААК давления, показанную на рис. 6.

При попадании рабочей точки $\alpha = f(W, p, q$ и др.) в область существования ТААК давления (по параметру q) можно предполагать (или утверждать) об отсутствии кипения (или псевдокипения при сверхкритических параметрах), т. е. расчет коэффициента теплоотдачи α можно проводить обычными методами (без ТААК давления) с учетом рекомендаций о применении необходимых формул по определению коэффициента теплофизических свойств B и расчету «всплесков» и «впадин» α .

При попадании рабочей точки (при дальнейшем увеличении q) в область существования ТААК давления (см. рис. 6) расчет теплоотдачи надо вести по экспериментальным формулам, где подробно изложен метод расчета влияния ТААК давления на теплоотдачу к жидким УВГ (УВО) при различных значениях давления, скорости прокачки и плотности теплового потока.

В случае возможного (ожидаемого, прогнозируемого) возникновения ТААК давления необходимо выполнить всесторонний анализ предполагаемой конструкции акустического контура и организовывать различные методы и способы борьбы с этим опасным процессом, включая вывод данных о работе системы контроля и управления в бортовой и наземный компьютеры, а также на специальное табло и пульт управления наземного оператора, летчика, космонавта.

В предлагаемую классификацию включены новые методы и способы борьбы с ТААК давления без применения E , с применением E и гибридный способ. В последнем должны быть заложены одновременно один или несколько способов без E и с E независимо от того, сколько задействовано пассивных, активных и активно-пассивных способов.

Методы и способы борьбы с ТААК давления без применения E . На основе результатов экспериментальных исследований без применения E можно предложить следующие методы и способы борьбы с ТААК давления.

Активные (или оперативные) методы и способы:

- изменение скорости прокачки W жидкого УВГ (УВО) на 5...10 %;
- уменьшение давления p на 0,01 МПа или более;
- изменение температуры стенки $T_{ст}$ канала путем снижения плотности теплового потока q (например, при джоулевом нагреве канала — при экспериментальном исследовании — уменьшением подаваемого напряжения для нагрева рабочего канала).

Пассивные методы и способы, основанные на разработке и создании:

- стационарного ГиК;
- стационарного наружного охлаждения ГК (для исключения перегрева и прогара в опасных нагреваемых зонах):
 - РО с естественной конвекцией жидкого (воды, УВГ, УВО и др.) или газообразного (воздуха, метана и др.) охладителя;
 - РО регенеративного или отдельного типа с вынужденной конвекцией жидкого или газообразного охладителя;
- стационарного наружного охлаждения «горячей» части ГиК или всего ГиК (для исключения появления опасных зон перегрева и прогара):

- РО с естественной конвекцией жидкого или газообразного охладителя;
- РО регенеративного или отдельного типа с вынужденной конвекцией жидкого или газообразного охладителя;
- ГК или «горячей» части ГиК (для исключения возможности перегрева и прогара в опасных зонах):
 - с утолщением стенки (без изменения внутреннего диаметра) либо по длине всего ГК или «горячей» части ГиК, либо в предполагаемых расчетных зонах перегрева и прогара;
 - с размещением наружных поперечных ребер (различных типов и конфигураций) в предполагаемых расчетных зонах перегрева и прогара;
 - с расположением ГК в другом канале (большого диаметра и повышенной теплопроводности, например из меди) и обеспечением контактной теплопроводности типа «труба в трубе»;
- специальных стационарных экранов, расположенных в зонах источников тепла — в зонах горения, электронагрева и т. д. (для уменьшения поступления q на охлаждаемую стенку и каналы РО путем снижения эффективности источника тепла для предотвращения возникновения ТААК давления).

Активно-пассивные методы и способы:

- разработка и создание ГиК, где «холодный» участок (при угрозе перегрева или прогара в локально чередующихся зонах «горячей» части) можно быстро присоединить к «горячему» (в ручном, полуавтоматическом или автоматическом режиме), а сам ГК имеет утолщения стенки в предполагаемых расчетных областях перегрева и прогара;
- оперативное вмешательство человека в работу двигателя, ЭУ или ТС в целях предотвращения пожара и взрыва с использованием указанных активных методов и способов борьбы с ТААК давления.

Методы и способы борьбы с ТААК давления с применением E . При разработке таких способов борьбы с ТААК давления необходимо учитывать общие и частные методики эксплуатации рабочих соосных игл — РУ — системы типа игла–игла в жидких (и газообразных) УВГ (УВО) в условиях их естественной и вынужденной конвекции.

Пассивные методы и способы, основанные на разработке и создании:

- стационарной наружной РО для ГК с естественной конвекцией жидкого или газообразного охладителя (в том числе УВГ (УВО)), с размещением в ней стационарных РУ с E . Включение E осуществляется одновременно с запуском двигателя, ЭУ, ЭУМИ, ТС и ТСМИ, а выключение — после их останова и охлаждения деталей топливно-охлаждающей системы до температуры менее 100 С (что связано с процессами борьбы с осадкообразованием в УВГ (УВО)). Каждая пара соосных рабочих игл в РУ расположена в РО в предполагаемой расчетной локальной зоне перегрева и прогара, отдающая игла — под каналом, а принимающая — над каналом;
- ГК с внутренним стационарным размещением рабочих соосных игл в РУ с E в стационарной РО с вынужденной конвекцией охладителя. Включение и выключение E выполняется так же, как и в предыдущем случае;
- ГК с внутренним продольным размещением стационарных рабочих соосных игл в РУ с E в предполагаемых расчетных локальных зонах перегрева и прогара;
- ГК с наружной РО любого типа, где рабочие соосные иглы в РУ с E расположены как внутри канала, так и в РО;
- ГК с наружным размещением стационарных рабочих соосных игл в РУ с E , например, на открытом воздухе.

Активные методы и способы:

- регулирование высоковольтного электростатического напряжения, подаваемого на стационарные рабочие соосные иглы в РУ, в целях увеличения эффективности работы электрического ветра по разрушению пузырей или псевдопузырей в канале с жидким УВГ (УВО), т. е. по уничтожению зарождения ТААК давления;
- разработка и создание подвижной системы с E (настраиваемых, раздвижных и подвижных пар рабочих соосных игл в РУ и самих игл в РУ) внутри ГК, РО, ГК и РО и снаружи ГК на открытом воздухе (при исследовании в наземных условиях) с возможностью регулирования оператором расстояния между остриями игл в РУ, между парами соосных игл в РУ и напряжения, подаваемого на РУ.

Активно-пассивные методы и способы:

- регулирование электростатического напряжения, подаваемого на стационарные рабочие соосные иглы в РУ, расположенные:
 - в «горячей» части ГиК (три способа — два пассивных (наличие ГиК и стационар-

ных РУ с E) и один активный (регулирование и настройка E));

– в наружной РО ГК (три способа — два пассивных (применение наружной РО и стационарных РУ с E) и один активный (регулирование и настройка E));

– в наружной РО «горячей» части ГиК (четыре способа — три пассивных (использование ГиК, наружной РО и стационарных РУ с E) и один активный (регулирование и настройка E));

• в ГК с наружным утолщением стенки в предполагаемых опасных зонах перегрева и прогара, с внутренним расположением рабочих соосных игл в РУ с E (два пассивных способа), где оператор может регулировать подаваемое на подвижные РУ электростатическое напряжение и расстояние между остриями рабочих соосных игл, передвигать пары соосных игл в опасные зоны (три активных способа с E) и уменьшать скорость прокачки охладителя (один активный способ без E);

• в ГиК, имеющем наружную РО с вынужденной конвекцией охладителя, наружное утолщение стенки «горячей» части канала в предполагаемых расчетных зонах перегрева и прогара и подвижные рабочие соосные иглы в РУ с E , размещенные внутри «горячей» части ГиК и в РО (четыре пассивных способа), где оператор может регулировать напряжение, подаваемое на РУ внутри «горячей» части ГиК и в РО, расстояние между остриями рабочих соосных игл внутри «горячей» части ГиК, передвигать пары рабочих соосных игл в опасные зоны, увеличивать скорость прокачки охладителя в РО и уменьшать давление в ГиК (шесть активных способов).

Возможны и другие варианты одновременного применения различных активных и пассивных способов борьбы с ТААК давления.

Виды борьбы с ТААК давления гибридным способом:

• в ГК: утолщение стенок в предполагаемых зонах перегрева и прогара и повышение давления в канале (пассивный и активный способы без E), размещение внутри ГК подвижных рабочих соосных игл в РУ с E (пассивный способ с E), увеличение подаваемого на рабочие соосные иглы в РУ напряжения, перемещение пар рабочих соосных игл в РУ в уточненные зоны перегрева и прогара, уменьшение расстояния между остриями РУ (три активных способа с E);

• в ГиК: применение наружной РО с вынужденной конвекцией жидкого УВГ (УВО) и утолщение стенки по всей длине «горячего» участка (два пассивных способа без E), повышение скорости прокачки жидкого УВГ (УВО) в канале и РО, давления в РО (три активных способа без E); размещение в РО подвижных пар соосных рабочих игл в РУ с E (пассивный способ с E), перемещение пар соосных рабочих игл в РУ по уточненным координатам предполагаемых мест перегрева и прогара и увеличение расстояния между остриями игл в РУ (два активных способа с E).

Возможны и другие варианты борьбы с ТААК давления гибридным способом.

Позитивные и негативные процессы, происходящие при ТААК давления, являются основой для их эффективного использования и организации борьбы с ними в перспективных ЖРД, ЖРДМИ, ЭУ, ЭУМИ, ТС и ТСМИ.

На основе результатов экспериментальных исследований разработаны и запатентованы новые конструктивные схемы ЖРД, ЖРДМИ, ЭУ, ЭУМИ, ТС и ТСМИ различного назначения и базирования, каналов, фильтров, форсунок, датчиков и систем контроля и управления, где организована борьба с ТААК давления и с осадкообразованием и, наоборот, искусственно создаются условия для возникновения и роста углеродистого осадка и ТААК давления (патенты РФ: 2155910, 2194974, 2215671, 2213291, 2212364, 2228456, 2287715, 2289078, 2388966, 2452896, 2504676, 2482413, 2467195, 2447362, 2504843, 2580675 и др.).

В.А. Алтунин впервые разработал новые конструктивные схемы ЖРД и ЖРДМИ [18], в которых предусмотрены комплексные меры:

• по защите:

– топливно-охлаждающих каналов от самопроизвольного возникновения ТААК давления в РО в области критического сечения сопла;

– топливно-охлаждающих каналов (включая форсунки, фильтры) от появления ТУО;

– форсунок от отколовшихся частиц ТУО и процесса осадкообразования;

• по исключению образования локально чередующихся зон перегрева топливно-охлаждающих каналов в области критического сечения сопла ЖРД;

• по предупреждению ТААК давления и процесса осадкообразования путем создания различных датчиков контроля и управления с выводом данных в бортовой и наземный компью-

теры, а также на специальное табло наземного оператора, летчика, космонавта;

• по искусственному зарождению и существованию ТААК давления путем создания (при необходимости) требуемых термодинамических условий для жидких УВГ (УВО), что очень важно для обеспечения экстренной очистки топливно-охлаждающих трактов ЖРДМИ от ТУО в процессе космического орбитального полета.

Выводы

1. Выполнен анализ тепловых процессов в рубашках охлаждения ЖРД, ЖРДМИ и других ЭУ, ТС на жидких УВГ (УВО). Рассмотрены позитивные и негативные аномальные эффекты, происходящие в жидких УВГ (УВО), наиболее опасными из которых являются осадкообразование и ТААК давления, а также существующие методы и способы борьбы с ТААК давления.

2. Обоснована необходимость проведения всесторонних и фундаментальных экспериментальных исследований ТААК давления в каналах с термодинамическими состояниями жид-

ких УВГ (УВО), соответствующими реальным двигателям, ЭУ и ТС.

3. Создана экспериментальная база и проведены исследования без применения E и с их применением.

4. Описаны и показаны тепловые процессы и термодинамические условия возникновения и поддержания ТААК давления без влияния E и с их влиянием.

5. На основе результатов экспериментальных исследований разработаны и запатентованы новые методы и способы борьбы с ТААК давления в каналах с жидкими УВГ (УВО), которые могут быть использованы в дальнейших научных изысканиях и при разработке новой техники с улучшенными характеристиками.

6. Применение материалов статьи и патентов на изобретения при разработке перспективной отечественной техники одно- и многофазового использования наземного, воздушного, аэрокосмического и космического базирования будет способствовать дальнейшему повышению ее надежности, ресурса, безопасности, экономичности и экологичности.

Литература

- [1] Коротеев А.С., Самойлов Л.П. Перспективные ЖРД России. *Двигатель*, 2000, № 2(8), с. 2–7.
- [2] Торгашин А.С., Бегишев А.М., Ерисов А.А. Перспективные разработки ЖРД многофазового использования. *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*, Красноярск, Сибирский гос. аэрокосмический ун-т им. акад. М.Ф. Решетнёва, 2016, т. 1, № 12, с. 214–216.
- [3] Алтунин В.А. Некоторые пути развития ЖРД многофазового использования на жидких углеводородных горючих и охладителях. *Матер. XLIII Научных чтений памяти К.Э. Циолковского*, Калуга, 16–18 сентября 2008 г., Калуга, Изд-во Эйдос, 2008, с. 103–104.
- [4] Алтунин В.А., Алтунин К.В., Обухова Л.А., Платонов Е.Н., Коханова С.Я., Яновская М.Л. Разработка способов борьбы с термоакустическими автоколебаниями давления в каналах рубашек охлаждения ЖРД и комбинированных силовых установок для гиперзвуковых и воздушно-космических летательных аппаратов. *XL Академические чтения по космонавтике. Сб. тез.*, Москва, 26–29 января 2016 г., Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. 335 с.
- [5] Кафенгауз Н.Л. О связи кризиса теплообмена с высокочастотными автоколебаниями давления. *Инженерно-физический журнал*, 1969, т. 16, № 4, с. 725–729.
- [6] Кафенгауз Н.Л. Обзор экспериментальных исследований термоакустических колебаний при теплоотдаче к турбулентному потоку жидкости в трубах. *Вопросы тепло- и массопереноса в энергетических установках. Сб. науч. тр.*, Москва, 1974, вып. 19, с. 106–130.
- [7] Кафенгауз Н.Л. *Анализ исследования термоакустических автоколебаний при теплоотдаче к жидкости в большом объеме и к турбулентному потоку жидкости в трубах (обзор)*. Москва, Информэнерго, 1976. 46 с.
- [8] Васьянов В.Д., Кафенгауз Н.Л., Лебедева А.Г., Тимаков А.В., Чеканов В.В. О механизме термоакустических автоколебаний. *Инженерно-физический журнал*, 1978, т. 34, № 5, с. 773–775.

- [9] Аладьев И.Т., Дышель Н.Н., Кафенгауз Н.Л. Влияние теплообмена на скорость звука в турбулентном потоке жидкости. *ТВТ*, 1981, т. 19, № 5, с. 1108–1111.
- [10] Ерошенко В.М., Кафенгауз Н.Л., Лубановский В.И., Яновский Л.С., Яскин Л.А. *Способ очистки поверхности трубопровода высокого давления*. А.с. 1118438 СССР, 1984. 18 с.
- [11] Герлига В.А., Ветров В.И. Экспериментальное исследование термоакустических колебаний в обогреваемых каналах при сверхкритических давлениях. *Известия вузов. Авиационная техника*, 1978, № 1, с. 31–36.
- [12] Каплан Ш.Г., Толчинская Р.Б. Возникновение высокочастотных колебаний давления в процессе теплообмена при вынужденном движении жидкости. *Инженерно-физический журнал*, 1969, т. 17, № 3, с. 486–490.
- [13] Калбалиев Ф.И. *Теплоотдача при сверхкритических давлениях вещества (ароматические углеводороды)*. Дис. ... д-ра техн. наук. Баку, 1985. 412 с.
- [14] Бабаева С.Ш. Исследование тепловых процессов в теплообменных аппаратах. *Проблемы энергетики*, 2003, № 1, с. 36–41.
- [15] Вердиев Ч.М., Калбалиев Р.Ф. Надежность энергетического оборудования, работающего при пульсационном режиме и сверхкритических давлениях вещества. *Рациональное использование энергоресурсов и надежность электрооборудования*. Тр. конф., Баку, АТНА, 2000, с. 154–158.
- [16] Дорофеев Б.М., Волкова В.И. Гидродинамические и термоакустические автоколебания при поверхностном кипении в каналах. *Акустический журнал*, 2008, т. 54, № 5, с. 732–739.
- [17] Алтунин В.А., Алтунин К.В., Коханова С.Я., Платонов Е.Н., Демиденко В.П., Яновская М.Л. Организация контроля за тепловыми процессами в топливно-охлаждающих и подающих системах двигателей летательных аппаратов. *Проблемы и перспективы развития двигателестроения*. Матер. Междунар. науч.-техн. конф., Самара, 22–24 июня 2016 г., Самара, Изд-во Новая техника, 2016, ч. 1, с. 169–170.
- [18] Алтунин В.А. *Способ повышения надежности ЖРД одно- и многократного использования*. Пат. 2287715 РФ, 2006, бюл. № 32. 25 с.
- [19] Ильинский В.М. *Системы контроля авиационных силовых установок*. Москва, Изд-во Транспорт, 1980. 85 с.
- [20] Яновский Л.С. *Инженерные основы авиационной химмотологии*. Казань, Изд-во Казан. ун-та, 2005. 714 с.

References

- [1] Koroteev A.S., Samoilov L.P. Perspektivnye ZhRD Rossii [Promising LRE Russia]. *Dvigatel' [Engine]*. 2000, no. 2(8), pp. 2–7.
- [2] Torgashin A.S., Begishev A.M., Erisov A.A. Perspektivnye razrabotki ZhRD mnogorazovogo ispol'zovaniia [Future developments reusable rocket engine]. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики* [Actual problems of aviation and cosmonautics]. Krasnoyarsk, SibSAU publ., 2016, vol. 1, no. 12, pp. 214–216.
- [3] Altunin V.A. Nekotorye puti razvitiia ZhRD mnogorazovogo ispol'zovaniia na zhidkikh uglevodorodnykh goriuchikh i okhladiteliakh [Some ways of development of reusable rocket engines on liquid hydrocarbon fuels and coolers]. *Mater. 43 nauchnykh chtenii pamiati K.E. Tsiolkovskogo* [Mater. 43 scientific readings of memory of K.E. Tsiolkovsky], Kaluga, 16–18 September 2008, Kaluga, Eidos publ., 2008, pp. 103–104.
- [4] Altunin V.A., Altunin K.V., Obukhova L.A., Platonov E.N., Kokhanova S.Ia., Ianovskaia M.L. Razrabotka sposobov bor'by s termoakusticheskimi avtokolebaniiami davleniia v kanalakh rubashek okhlazhdeniia ZhRD i kombinirovannykh silovykh ustanovok dlia giperzvukovykh i vozdushno-kosmicheskikh letatel'nykh apparatov [Development of methods of suppression of thermoacoustic self-excited oscillations of the pressure in the channels of cooling a rocket engine and combined power plants for hypersonic and aerospace aircraft]. *50 Akademicheskie chteniia po kosmonavtike. Sb. Tez.* [50 Academic readings on cosmonautics. Abstracts]. Moscow, 26–29 January 2016, Moscow, Bauman Press, 2015. 335 p.

- [5] Kafengauz N.L. O sviazi krizisa teploobmena s vysokochastotnymi avtokolebaniiami davleniia [About the connection of the crisis of heat exchange with the high-frequency self-excited oscillations of the pressure]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal* [Journal of Engineering Physics and Thermophysics]. 1969, vol. 16, no. 4, pp. 725–729.
- [6] Kafengauz N.L. Obzor eksperimental'nykh issledovaniy termoakusticheskikh kolebanii pri teplootdache k turbulentnomu potoku zhidkosti v trubakh [Review of experimental studies of thermoacoustic oscillations in heat transfer to turbulent liquid flow in pipes]. *Voprosy teplo- i massoperenosa v energeticheskikh ustanovkakh. Sb. nauchnykh tr.* [Issues of heat and mass transfer in power plants. Collection of scientific papers]. Moscow, 1974, is. 19, pp. 106–130.
- [7] Kafengauz N.L. Analiz issledovaniia termoakusticheskikh avtokolebanii pri teplootdache k zhidkosti v bol'shom ob'eme i k turbulentnomu potoku zhidkosti v trubakh (obzor) [The study of thermoacoustic oscillations in heat transfer to the liquid in large volume and to turbulent fluid flow in tubes (a review)]. Moscow, Informenergo publ., 1976. 46 p.
- [8] Vas'ianov V.D., Kafengauz N.L., Lebedeva A.G., Timakov A.V., Chekanov V.V. O mekhanizme termoakusticheskikh avtokolebanii [On the mechanism of thermoacoustic oscillation]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal* [Journal of Engineering Physics and Thermophysics]. 1978, vol. 34, no. 5, pp. 773–775.
- [9] Alad'ev I.T., Dyshel' N.N., Kafengauz N.L. Vliianie teploobmena na skorost' zvuka v turbulentnom potoke zhidkosti [The effect of heat transfer on the speed of sound in a turbulent fluid flow]. *TVT* [High Temperature]. 1981, vol. 19, no. 5, pp. 1108–1111.
- [10] Eroshenko V.M., Kafengauz N.L., Lubanovskii V.I., Ianovskii L.S., Iaskin L.A. *Sposob ochistki poverkhnosti truboprovoda vysokogo davleniia* [A method of cleaning a surface of truboprovoda high pressure]. Patent RF no. 1118438, 1984.
- [11] Gerliga V.A., Vetrov V.I. Eksperimental'noe issledovanie termoakusticheskikh kolebanii v obogrevaemykh kanalakh pri sverkhkriticheskikh davleniiakh [Experimental investigation of thermoacoustic oscillations in heated channels at supercritical pressures]. *Izvestiia vuzov. Aviatsionnaia tekhnika* [Russian Aeronautics]. 1978, no. 1, pp. 31–36.
- [12] Kaplan Sh.G., Tolchinskaia R.B. Vozniknovenie vysokochastotnykh kolebanii davleniia v protsesse teploobmena pri vynuzhennom dvizhenii zhidkosti [The emergence of high frequency pressure fluctuations in the process of heat exchange at the forced motion of a fluid]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal* [Journal of Engineering Physics and Thermophysics]. 1969, vol. 17, no. 3, pp. 486–490.
- [13] Kalbaliev F.I. *Teplootdacha pri sverkhkriticheskikh davleniiakh veshchestva (aromaticheskie uglevodorody)*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Heat transfer at supercritical pressures of a substance (aromatic hydrocarbons). Doct. tech. sci. diss.]. Baku, 1985. 412 p.
- [14] Babaeva S.Sh. Issledovanie teplovykh protsessov v teploobmennykh apparatakh [The study of thermal processes in heat exchangers]. *Problemy energetiki* [Energy problems]. 2003, no. 1, pp. 36–41.
- [15] Verdiev Ch.M., Kalbaliev R.F. Nadezhnost' energeticheskogo oborudovaniia, rabotaiushchego pri pul'satsionnom rezhime i sverkhkriticheskikh davleniiakh veshchestva [The reliability of the electric equipment operating at pulse mode and supercritical pressures of a substance]. *Ratsional'noe ispol'zovanie energoresursov i nadezhnost' elektrooborudovaniia. Tr. konf.* [Rational use of energy resources and reliability of electrical equipment. Proceedings of the conference]. Baku, ATNA publ., 2000, pp. 154–158.
- [16] Dorofeev B.M., Volkova V.I. Hydrodynamic and thermoacoustic self-oscillations at surface boiling in channels. *Acoustical Physics*, 2008, vol. 54, no. 5, pp. 633–639.
- [17] Altunin V.A., Altunin K.V., Kokhanova S.Ia., Platonov E.N., Demidenko V.P., Ianovskaia M.L. Organizatsiia kontroliia za teplovymi protsessami v toplivno-okhlazhdaiushchikh i podaiushchikh sistemakh dvigatelei letatel'nykh apparatov [Planning of control for heat processes in fuel-cooling and fuel-delivering systems of aircraft engines]. *Problemy i perspektivy razvitiia dvigatelestroeniia* [Problems and prospects of engine development]. Samara, June 22–24, 2016, Samara, Novaia tekhnika publ., 2016, pt. 1, pp. 169–170.
- [18] Altunin V.A. *Sposob povysheniia nadezhnosti ZhRD odno – i mnogorazovogo ispol'zovaniia* [Method of increase of reliability of LPRE single and reusable]. Patent RF no. 2287715, 2006. 25 p.

- [19] Il'inskiy V.M. *Sistemy kontrolya aviatsionnykh silovykh ustanovok* [Control system aviation power units]. Moscow, Transport publ., 1980. 85 p.
- [20] Ivanovskii L.S. *Inzhenernye osnovy aviatsionnoi khimmotologii* [Engineering fundamentals of aviation chemmotology]. Kazan', Kazan. un-t publ., 2005. 714 p.

Статья поступила в редакцию 27.06.2017

Информация об авторах

АЛТУНИН Виталий Алексеевич (Казань) — доктор технических наук, профессор кафедры «Теплотехника и энергетическое машиностроение», академик Российской академии космонавтики им. К.Э. Циолковского (РАКЦ), КНИТУ им. А.Н. Туполева — КАИ (420111, Казань, Российская Федерация, ул. К. Маркса, д. 10, e-mail: altspacevi@yahoo.com).

АЛТУНИН Константин Витальевич (Казань) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплотехника и энергетическое машиностроение». КНИТУ им. А.Н. Туполева — КАИ (420111, Казань, Российская Федерация, ул. К. Маркса, д. 10).

АЛИЕВ Исмаил Новрузович (Москва) — доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Техническая физика». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

ПЛАТОНОВ Евгений Николаевич (Казань) — докторант кафедры «Теплотехника и энергетическое машиностроение», член Российской академии космонавтики им. К.Э. Циолковского. КНИТУ им. А.Н. Туполева — КАИ (420111, Казань, Российская Федерация, ул. К. Маркса, д. 10).

КОХАНОВА Светлана Яковлевна (Казань) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплотехника и энергетическое машиностроение», член Российской академии космонавтики им. К.Э. Циолковского. КНИТУ им. А.Н. Туполева — КАИ (420111, Казань, Российская Федерация, К. Маркса ул., д. 10).

ЯНОВСКАЯ Мария Леонидовна (Москва) — кандидат технических наук, научный сотрудник. ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова» (111116, Москва, Российская Федерация, Авиамоторная ул., д. 2).

Information about the authors

ALTUNIN Vitaliy Alekseevich (Kazan) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Heat and Power Engineering, Academician of the Russian Academy of Cosmonautics named after K.E. Tsiolkovsky. Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI (420111, Kazan, Russian Federation, K. Marx St., Bldg. 10, e-mail: altspacevi@yahoo.com).

ALTUNIN Konstantin Vitalievich (Kazan) — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Heat and Power Engineering. Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI (420111, Kazan, Russian Federation, K. Marx St., Bldg.10).

ALIEV Ismail Novruzovich (Moscow) — Doctor of Science (Physics and Math), Professor, Department of Technical Physics, Bauman Moscow State Technical University. (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., 5, Block 1).

PLATONOV Evgeniy Nikolaevich (Kazan) — Doctoral Candidate, Department of Heat and Power Engineering, Member of the Russian Academy of Cosmonautics named after K.E. Tsiolkovsky. Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI (420111, Kazan, Russian Federation, K. Marx St., 10).

KOKHANOVA Svetlana Yakovlevna (Kazan) — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Heat and Power Engineering, Member of the Russian Academy of Cosmonautics named after K.E. Tsiolkovsky. Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI (420111, Kazan, Russian Federation, K. Marx St., 10).

YANOVSKAYA Maria Leonidovna (Moscow) — Candidate of Science (Eng.), Researcher. Federal State Unitary Enterprise — Baranov Central Institute of Aviation Motors CIAM (111116, Moscow, Russian Federation, Aviamotornaya St., 2).