УДК 629.7.036.34, 532.526, 536.244

Нестационарные эффекты в криогенных топливных магистралях современных авиационных двигателей

Д-р техн. наук **В. М. КРАЕВ[1], А. Р. АСЛАНОВ[2]**
[1]kraevvm@mail.ru, [2]asvar.aslanov96@mail.ru
Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)

В работе рассматриваются перспективы применения криогенного топлива для гражданских самолетов. Приводятся примеры успешных испытаний таких систем на жидком водороде в СССР в 90-х годах XX века. Оценивается перспективность применения жидкого метана в качестве авиационного топлива. Проводится анализ проблем, связанных с применением криогенных топлив для гражданской авиации. Одной из серьезных проблем, стоящих перед возможностью применения криогенного топлива, является чувствительность жидких криогенных топлив к нерасчетному изменению теплоотдачи и гидродинамики в магистралях системы подачи топлива. Двигателю, работающему на криогенном топливе, как любому авиационному двигателю, присуще переходные режимы работы, которые являются существенно нестационарными. Как вариант рассматривается изменение расхода топлива в несколько раз при переходе на взлетный режим. По анализу проведенных ранее исследований, авторы приходят к выводу о необходимости расчета переходных процессов в системах подачи криогенного топлива. Проведенные ранее экспериментальные исследования в МАИ показали существенное, до 2–3-х раз, изменение теплообмена и гидродинамики в топливных магистралях в переходных режимах работы двигателя. Анализ причин такого влияния говорит о перестройке структуры турбулентного потока, что и приводит к росту коэффициентов теплоотдачи и сопротивления при ускорении точения и к их снижению при замедлении. Авторы дают рекомендации по определению границ применимости квазистационарного подхода, когда для расчета нестационарных процессов применяются стационарные зависимости. Предлагаются варианты учета влияния гидродинамической нестационарности на работу криогенной топливной системы перспективных авиационных двигателей. Авторы считают необходимым проведение исследований с целью создания модели нестационарных турбулентных течений криогенных жидкостей в каналах.

Ключевые слова: криогенное топливо, авиационные двигатели, нестационарные процессы, гидродинамика и теплообмен в каналах.

Информация о статье:
Поступила в редакцию 20.10.2020, принята к печати 20.01.2021
DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-1-3-11
Язык статьи — русский
Для цитирования:
Краев В. М., Асланов А. Р. Нестационарные эффекты в криогенных топливных магистралях современных авиационных двигателей // Вестник Международной академии холода. 2021. № 1. С. 3–11.
DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-1-3-11

Unsteady effects in cryogenic fuel pipelines of perspective aviation jet engines

D. Sc. **V. M. KRAEV[1], A. R. ASLANOV[2]**
[1]kraevvm@mail.ru, [2]asvar. aslanov96@mail.ru
Moscow Aviation Institute (National Research University)

The perspective for the use of cryogenic fuel for civil aircraft is discussed. Successful tests of cryogenic fuel for aviation jet engines were done in the USSR in the 90s of the XX century with liquid hydrogen. The authors proved efficiency of using liquid methane as an aviation fuel. The issues related to cryogenic fuels in civil aviation are analyzed. One of the serious problems in using liquid cryogenic fuels is the thermodynamically sensitivity of them to non-calculated heat transfer and hydrodynamics changes of fuel supply pipelines. An engine running on cryogenic fuel has the transient modes of operation. These transient modes are significantly unsteady. Several times' change in fuel flow rate is considered as an alternative when switching to take-off mode. Based on the analysis of previous studies, the authors came to conclusion that it is necessary to apply unsteady model for unsteady processes in cryogenic fuel supply systems calculation. Results of the experimental research in Moscow Aviation Institute showed a significant, up to 2–3 times, change in heat exchange and hydrodynamics in fuel lines in transient modes of engine operation. The reason for this unsteady influence is a restructuring of the turbulent flow structure. This changes in turbulent flow structure results in an increase in the heat transfer and resistance coefficients when accelerating and to their decrease when decelerating.

The authors calculated the limits for quasi-steady approach and gave recommendations for unsteady process in cryogenic pipelines calculation. The way to avoid the effect of hydrodynamic unsteadiness in the cryogenic fuel system is proposed. The authors consider it necessary to continue the research in order to create a model of unsteady turbulent flows in cryogenic liquids in channels.

Keywords: cryogenic fuel, aero engines, non-stationary processes, hydrodynamic and heat transfer in channels.

Article info:
Received 20/10/2020, accepted 20/01/2021
DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-1-3-11
Article in Russian
For citation:
Kraev V. M., Aslanov A. R. Unsteady effects in cryogenic fuel pipelines of perspective aviation jet engines. *Journal of International Academy of Refrigeration.* 2021. No 1. p. 3–11. DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-1-3-11

Введение

Авиационный гражданский транспорт, как никакой, наверное, чрезмерно чувствителен к росту цен на традиционные углеводородные топлива. Эта зависимость связана с весомой топливной составляющей в стоимости авиаперевозок. Создатели авиационных двигателей уже более 30-и лет назад осуществляли попытки перейти на альтернативные топлива.

Среди альтернативных видов топлива для авиационных двигателей рассматривались как биотоплива [1], так и криогенные топлива. Биотоплива представляют собой топливо из растительного или животного сырья, из продуктов жизнедеятельности организмов или органических промышленных отходов. Несмотря на преимущества по некоторым показателям качества перед нефтяными, биотоплива не являются идеальными, т. к. для их производства все же требуются энергия и ресурсы. К криогенным топливам относится: сжижений природный газ (далее — СПГ) состоящий в основном из метана, жидкий водород и криогенный пропан.

Над переходом на криогенное водородное авиационное топливо активно работает Airbus. В проекте ZEROe Airbus представил три концепта самолетов с нулевым уровнем выброса углекислого газа на водородном топливе. Уже в 2035 году Airbus планирует вывести на рынок первые самолеты [2]. Гибридная и полностью электрическая авиация набирает обороты [3].

Криогенные топлива для авиации имеет ряд особенностей по сравнению с традиционным топливом на основе углеводородов. Кроме того, криогенное топливо является выгодным с точки зрения соответствия экологическим требованиям. Например, при использовании жидкого метана, который предполагается использовать в качестве топлива в настоящем исследовании, отсутствуют выбросы свинца и серы. Такое топливо является с точки зрения экологии прямым конкурентом авиационному керосину.

Однако, применение авиационных криогенных топлив сопряжено с рядом задач, касающихся теплофизических свойств криогенных жидкостей. Рассматривается одна из серьезных проблем, стоящих перед возможностью применения криогенного топлива, а именно, чувствительность жидких криогенных топлив к нерасчётному изменению теплоотдачи и гидродинамики в магистралях системы подачи топлива. Подобные изменения коэффициентов теплоотдачи и гидравлического сопротивления применительно к криогенным жидкостям могут быть причиной аварийных ситуаций.

Цели и задачи исследования

При разработке топливных систем криогенных авиационных двигателей требуется провести оценку влияния гидродинамической нестационарности, вызванной переходными режимами работы силовой установки на коэффициенты теплоотдачи и гидравлического сопротивления.

Для достижения поставленной цели авторы предполагают провести анализ теплофизических свойств криогенных топлив, рассмотреть принципиальную схему криогенной топливной системы, провести анализ ее математической модели. Проведенные ранее экспериментальные исследования по изучению структуры турбулентных течений в гидродинамически нестационарных условиях позволили создать математическую модель. С помощью этой математической модели в настоящем исследовании авторы предполагают провести оценку влияния переходных режимов работы авиационных двигателей на теплоотдачу и гидродинамику в каналах топливной системы и выявить ряд ключевых параметров, определяющих влияние нестационарных условий. На основании полученных результатов будут сформулированы выводы и степени влияния переходных режимов на устойчивость работы криогенных авиационных двигателей, а также определить план дальнейших исследований.

Расчетно-теоретическая оценка влияния нестационарных явлений в криогенных топливных магистралях

История применения криогенных авиационных топлив насчитывает не один десяток лет. В 1988 г. в Советском Союзе был испытан летательный аппарат с двигателем на жидком водороде (Ту-155), а уже в 1989 г. начались испытания оборудования и исследования возможностей криоплана при использовании СПГ (Ту-156). В процессе первых испытаний криоплана на водородном топливе в 90-х годах прошлого века водород находился в переохлажденном состоянии (температура до −253 °С) с наддувом инертного газа в бак. В отличие от водорода СПГ находился на линии насыщения и не требовал дополнительного оборудования для поддержания его в жидком состоянии, что являлось существенным преимуществом. Впоследствии были разработаны несколько проектов самолетов на СПГ, но реализовать их по объективным причинам не удалось.

Криогенные топлива, имеют больший хладоресурс и работоспособность до его сжигания, а также большую, чем у авиационного керосина, теплоту сгорания (табл. 1).

Таблица 1

Основные свойства топлив

Table 1

Main characteristics of the fuels

	Показатель	Значение			
		ТС-1	СПГ	Водород	Пропан
1	Плотность, кг/м³ (при температуре, К)	778,6 (288)	424,7 (111)	71,5 (20)	580,0 (230)
2	Теплотворность, МДж/кг	43,5	50,0	120,0	45,9
3	Энергоемкость, МДж/м³	33855	21100	8450	26620
4	Хладоресурс, кДж/кг	1330	2830	13030	3180
5	Газовая постоянная, Дж/ (кг·К)	57,42	518,26	4124,42	115,24
6	Диапазон жидкой фазы, К при давлении 0,1 МПа	Эксплуатационный	91…111	14…20	86…230

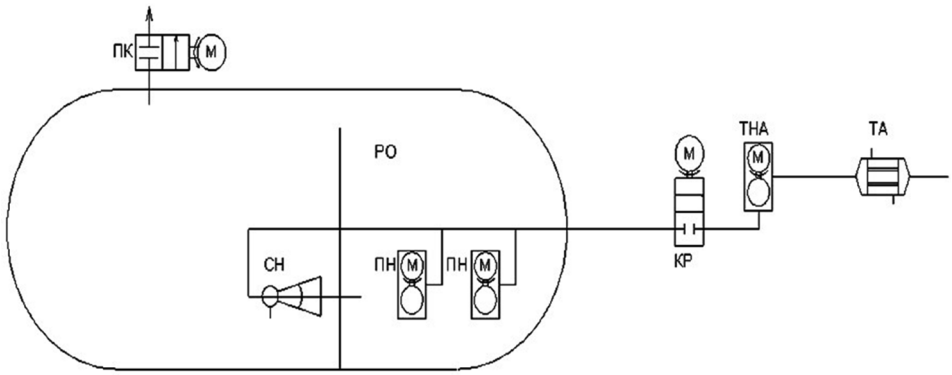

Рис. 1. Схема криогенной топливной системы:
ПК — предохранительный клапан; СН — струйный насос; ПН — подкачивающий насос; РО — расходный отсек;
КР — кран регулятор; ТНА — шнекоцентробежный турбонасосный агрегат; ТА — теплообменный аппарат

Fig. 1. Cryogenic fuel system: ПК — safety valve; СН — jet pump; ПН — boost pump; РО — fuel reservoir;
КР — control valve; ТНА — screw centrifugal turbopump assembly; ТА — heat-exchanger

В Центральном институте авиационного моторостроения имени П. И. Баранова (ЦИАМ) несколько лет назад возобновились исследования по формированию облика криогенной топливной системы (далее — *КТС*) для авиационных двигателей [4].

Рассмотрим схему КТС самолета (рис. 1). Основными элементами КТС являются: криогенный топливный бак, внутрибаковый подкачивающий насос, криогенные магистрали, турбонасосный агрегат (далее — ТНА), теплообменный аппарат газификатор (далее — ТА).

Для проведения расчетно-теоретических исследований по формированию предварительного облика КТС, выявлению особенности работы ее элементов и составлению рекомендации по организации режимов ее работы, была разработана математическая модель криогенной топливной системы. Математическая модель КТС — представляет собой совокупность математических моделей агрегатов топливной системы, позволяет определить давление, температуру, гидравлические потери во всех точках КТС.

В процессе формирования предварительного технического облика КТС определяются геометрические размеры элементов топливной системы, масса топливной системы и т. п. с контролем обеспечения работоспособности всех элементов топливной системы и двигателя.

КТС моделируется в условиях заданного полетного цикла (рис. 2), при котором в зависимости от участка полета двигатель работает на режиме, соответствующем определенному расходу топлива. Смена одного режима работы двигателя на другой сопровождается переходными процессами, которые зачастую являются существенно нестационарными. Это, в свою очередь, может привести к различного рода нестационарным эффектам в магистралях КТС.

Необходимо учесть, что топливо — метан находится на линии насыщения, поэтому оно чрезвычайно чувствительно к термодинамическим условиям в каждой точке КТС. В переходных точках полетного цикла меняется режим работы двигателя, и, следовательно, массовый расход жидкого топлива. В связи с этим возникают переходные процессы, которые являются нестационарными. Процессы теплообмена в нестационарных условиях могут сопровождаться существенными скачками по теплоотдаче и гидравлическим сопротивлениям. Скачки по теплоотдаче могут привести к вскипанию жидкого метана, что крайне недопустимо для устойчивой работы ТНА. Подкачивающий насос (ПН) предназначен для непрерывной подачи топлива к турбонасосному агрегату двигателя с требуемым расходом и кавитационным запасом, обеспечивающим надежную работу ТНА, а вскипание жидкого метана приводит к приросту давления насыщенных паров в трубопроводе в результате нагрева топлива, что определяет величину снижения кавитационного запаса ТНА и потребного напора ПН. К потере устойчивости в работе ТНА, и даже к его полному отключению, может привести также резкий перепад давлений из-за нестационарных эффектов по гидравлическим сопротивлениям.

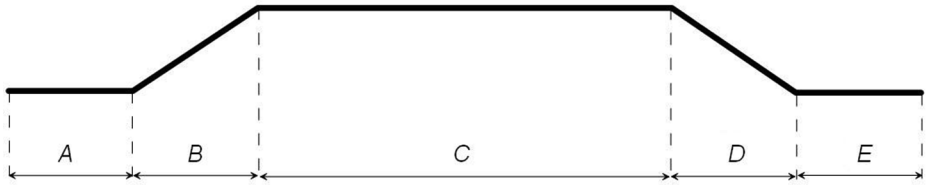

Рис. 2. Участки профиля полетного цикла:
A — стоянка перед полетом и руление, расход топлива 0,0–0,05 кг/с; B — набор высоты, расход 0,8 кг/с; C — крейсерский полет, расход 0,526 кг/с; D — снижение, расход 0,2 кг/с; E — посадка, руление и стоянка после посадки, 0,0–0,05 кг/с

Fig. 2. Flight cycle profile segments: A — parking and taxi, fuel consumption of 0.0–0.05 kg/s; B — climb, fuel consumption 0.8 kg/s; C — cruise flight, fuel consumption 0.526 kg/s; D — descent, fuel consumption 0.2 kg/s; E — landing, taxi and parking, 0.0–0.05 kg/s

Исследования нестационарных процессов проводятся активно в нашей стране и за рубежом начиная со 60-х годов XX века. Повышенный интерес в этой области можно объяснить как необходимостью понимания законов турбулентных течений, так и решением чисто практических задач. Решение этих задач должно было повысить надежность работы энергоустановок высокой мощности, в первую очередь атомных станций, на пусковых и переходных режимах.

Одной из первых обобщающих работ в области нестационарных течений в Массачусетском технологическом институте является статья И. Дэйли, В. Хенри и др. [5], в которой приводятся результаты исследований при течении воды.

В университете Миннесоты Эфраим Спэрроу с коллегами в 1960 году опубликовал результаты исследований нестационарного теплообмена в трубах [6].

В СССР одни из первых экспериментальных исследований ускоренного движения жидкости в цилиндрических трубах принадлежат Уно Лийву [7].

Влияние ускорения течения на процесс теплообмена изучали в Центре космических исследований им. Льюиса в Кливленде [8] при создании первых жидкостных ракетных двигателей на криогенных компонентах — жидкие водород и кислород. В 70-х годах XX века научная школа по исследованию нестационарной турбулентности появилась и в СССР в Московском авиационном институте [9]–[12]. Экспериментальные исследования проводились в круглой трубе, охлаждаемой постоянным турбулентным потоком воды. При нестационарном процессе — нагреве — наблюдался максимум изменения коэффициента теплоотдачи. Позднее фокус исследований был сконцентрирован на вероятной причине изменения теплоотдачи — экспериментальном исследовании структуры турбулентных течений, точнее, влиянию нестационарных эффектов на структуру турбулентных течений [13]–[16]. Предположение о влиянии перестройки профиля турбулентного течения при ускорении и замедлении было подтверждено экспериментально [17, 18].

Стоит отметить вклад теоретических исследований научной школы в Московском энергетическом институте [19]–[21]. Исследователи в МЭИ достигли серьезных успехов в анализе влияния теплофизических свойств теплоносителя на теплоотдачу и гидравлическое сопротивление.

Экспериментальные исследования профилей скорости, касательных напряжений и турбулентной вязкости при ускорении и замедлении течений проводились в 90-х годах в Университете Хоккайдо [22]. Было выявлено существенное отличие параметров в гидродинамически нестационарных условиях от стационарных.

Работы по изучению влияния нестационарного нагрева на коэффициент теплоотдачи проводились также в Днепропетровском государственном университете [23].

Экспериментальные исследования по влиянию ускорению и замедлению течения жидкости проводились в Израильском технологическом институте под руководством Д. Гринблатта [24, 25]. Результаты исследований свидетельствуют, что при ускорении потока в пристенной области увеличивается интенсивность генерации турбулентности, а также отмечено перемещение этой области к центру канала.

Качественно схожие результаты были описаны при экспериментальных исследованиях структуры нестационарного турбулентного воздушного потока в МАИ [26, 27].

В Южной Корее в последние десятилетия проводятся численные исследования турбулентных течений [28]. Влияние нестационарных условий исследовалось применительно к работе систем атомных станций. Данные моделирования показали рост интенсивности турбулентности при замедлении течения и качественно отличаются от экспериментальных данных [26, 27, 24, 25].

Стоит отметить работы И. В. Деревича [29, 30]. Автором проводится качественное сопоставление результатов расчета и эксперимента и отмечается принципиальное различие между расчетными и экспериментальными данными. Проведенный анализ свидетельствует о сложности нестационарных турбулентных процессов и отсутствии однозначной модели для практических расчетов.

Интерес представляют экспериментальные данные коллег из Великобритании [31]–[33]. Авторы отмечают определенное запаздывание изменения структуры потока на нестационарное воздействие и экспериментально подтвердили дополнительный рост турбулентности при ускорении потока и ее снижение при замедлении. В более поздних работах авторы [34, 35] приводят модель расчета, дающую качественное согласование с экспериментальными данными.

Как видно из приведенных выше работ, основная часть исследований фокусируется на исследовании не криогенных течений. Рост исследовательской активности за рубежом в области нестационарных процессов в криогенной области заметен в последние 5 лет. Основное внимание исследователи обращают на процессы, связанные с взаимодействием криогенных топливных компонентов в камере сгорания [36, 37]. Стоит отметить, что в качестве криогенно топлива предполагается использовать метан [38].

Применительно к разработке гиперзвуковых реактивных двигателей процессы теплообмена криогенных жидкостей на примере жидкого азота в каналах исследовали в Университете Тохоку в Японии [39].

В предыдущих работах мы уже говорили о необходимости анализа влияния нестационарных условий на тепловые и гидродинамические процессы [18]. Такое требование является следствием существенного изменения коэффициентов теплоотдачи и гидравлического сопротивления в нестационарных условиях. Когда мы говорим о существенных изменениях процессов, мы имеем ввиду отклонения реальных значений от значений коэффициентов теплоотдачи и гидравлического сопротивления, полученных при квазистационарных расчетах более 100% от реальных [18]. Очевидно, что такие, даже кратковременные изменения теплоотдачи и гидродинамики при разработке авиационной и космической техники должны быть учтены.

При рассмотрении гидродинамических нестационарных процессов необходимо понимать фундаментальные причины этих явлений. Исследования структуры турбулентных течений в нестационарных условиях проводятся в МАИ с 80-х годов [14, 16, 40]. Исследования показали, что основной причиной изменения теплообмена и гидродинамики в нестационарных условиях является изменение турбулентной структуры течения [26, 27].

Анализ экспериментальных данных по структуре турбулентных течений [40–42, 25] подтверждает существенное изменение структуры потока вблизи стенки канала, что не может не влиять на макропроцессы течения.

В вязком подслое $0<\eta<5$ (где η — безразмерная универсальная координата) течение является ламинарным.

$$\eta = U_* y/\nu, \qquad (1)$$

где y — расстояние от стенки канала, м; ν — коэффициент кинематической вязкости, м^2/с, U_* — динамическая скорость, Па·с;

$$U_* = \overline{U}\sqrt{\frac{\xi}{8}}, \qquad (2)$$

где ξ — коэффициент гидравлического сопротивления; $\overline{U}$ — средняя скорость, м/с.

Эта зона $0<\eta<5$ подвержена воздействию пульсаций скорости малой амплитуды из соседней области $5<\eta<15$, что приводит к регулярным выбросам вихревых структур в зоны, расположенные дальше от стенки канала $7<\eta<30$. В свою очередь, эти вихревые структуры сталкиваются с основным потоком ($30<\eta<70$). Такие столкновения и являются порождением турбулентности. Наиболее важным этапом в порождении турбулентности является возникновение и выброс вихревых структур, которые хотя и являются случайными, но, тем не менее, зависят от локальных условий на стенке канала.

В условиях ускорения течения профиль скорости становится более заполненным. Об этом говорят результаты не только исследований в МАИ [26], но и экспериментальные данные других авторов [41, 42]. Эффект «заполненности» профиля скорости ведет к «сжатию» пристенной зоны, что в конечном итоге интенсифицирует турбулентные выбросы от стенки канала в поток. Указанные процессы приводят к существенному росту турбулентной вязкости и турбулентной теплопроводности, а это в итоге — к росту теплообмена и сопротивления при ускорении потока.

При замедлении потока наблюдаются процессы, противоположные ускорению. Профиль скорости становится менее заполненным [26, 41, 42]. Интенсивность турбулентных выбросов в поток падает. В итоге это ведет к снижению коэффициента турбулентной вязкости и коэффициента турбулентной теплопроводности, и, следовательно, к уменьшению теплообмена и сопротивления при замедлении потока. τ

Авторами работы [16] был введен параметр для оценки степени нестационарности — критерий гидродинамической нестационарности K_g*.

$$K_g* = \frac{\partial G}{\partial \tau}\frac{1}{G}\sqrt{\frac{d}{g}}, \qquad (3)$$

где $\frac{\partial G}{\partial \tau}$ — темп изменения расхода, кг/с^2; G — расход, кг/с; d — внутренний диаметр канала, м; g — гравитационная постоянная, м/с^2.

Проведенные ранее исследования позволили разработать модель влияния нестационарных условий на теплообмен и гидродинамику турбулентных течений. На практике зачастую используется т. н. квазистационарный подход, когда теплоотдача и гидродинамика в нестационарных условиях рассчитывается по мгновенным параметрам течения по стационарным зависимостям. Результаты расчета теплоотдачи по этой модели, в сравнении с расчетами, выполненными по квазистационарному подходу, приведены на рис. 3. Изменение безразмерного коэффициента теплоотдачи во времени нестационарного процесса приведены для случая Re=3100 … 9300, K_g*=–0,111 … 0,111, T_w/T_f=1 … 1,18, при ускорении потока отличие предложенной модели [18] от квазистационарного подхода достигает 2-х раз. В качестве временной переменной используется безразмерное время нестационарного процесса $\overline{\text{Ho}}$.

На рис. 4 приведены зависимости для коэффициента гидравлического сопротивления при ускорении потока. На графиках представлены квазистационарные расчеты, расчеты по зависимостям Маркова С. Б. [41], Никифорова А. Н., Герасимова С. В. [42] и МАИ [18].

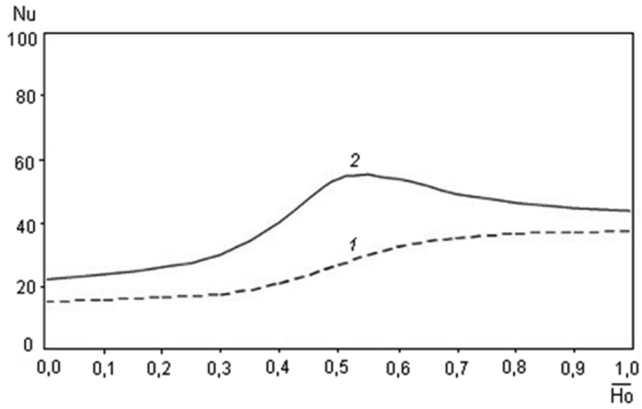

Рис. 3. Влияние ускорения потока на коэффициент теплоотдачи; Re=3100…9300, T_w/T_f=1,18: 1 — квазистационарный подход; 2 — расчет по модели МАИ [18]

Fig. 3. The effect of flow acceleration on heat-transfer coefficient; Re=3100…9300, T_w/T_f=1.18: 1 — quasi stationary approach; 2 — calculation according to Moscow Aviation Institute model [18]

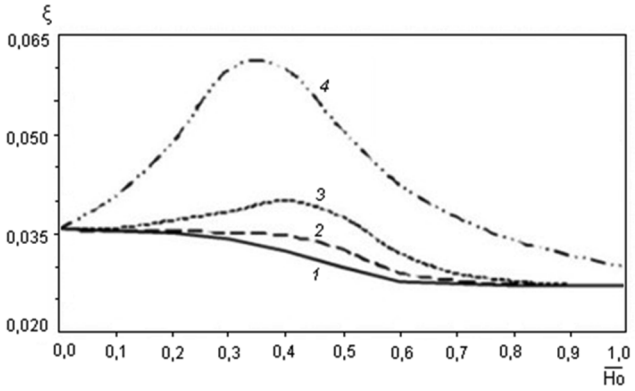

Рис. 4. Влияние ускорения потока на коэффициент гидравлического сопротивления (Re = 6200–18700, T_w/T_f = 1): 1 — квазистационарный расчет; 2 — экспериментальные данные Маркова С. Б. [41]; 3 — экспериментальные данные Никифорова А. Н., Герасимова С. В. [42]; 4 — экспериментально-расчетные данные МАИ [18]

Fig. 4. The effect of flow acceleration on hydraulic resistance coefficient (Re = 6200–18700, T_w/T_f = 1): 1 — quasi stationary calculation; 2 — experimental data by S. Markov [41]; 3 — experimental data by A. Nikiforv and S. Gearsimov [42]; 4 — experimental calculations by Moscow Aviation Institute [18]

Приведенные на рис. 3 и 4 данные по теплоотдаче и гидродинамике показывают существенное отличие от квазистационарного подхода, что подтверждает наш тезис о необходимости учета такого влияния при формировании облика в расчетах КТС.

Применение этих моделей к задачам по формированию КТС позволят учесть нестационарные явления, и, следовательно, существенно снизить как минимум объем расчетов по оптимизации параметров КТС и повысить надежность системы.

Проведем анализ влияния ускорения течения криогенного топлива при смене режима работы двигателей на «взлетный».

На рис. 5 и 6 приведены расчетные данные коэффициентов теплоотдачи и гидравлического сопротивления по модели МАИ [18] в относительном виде. Т. е. показано во сколько раз ускорение течения влияют на исследуемые параметры. По горизонтальной оси отложено время, при котором происходит нестационарный процесс. Каждая кривая соответствует определенному диаметру канала.

Анализ проведенных расчетов показывает, что время продолжительности нестационарного процесса играет превалирующую роль, и чем быстрее протекает нестационарный процесс, тем более весомо влияние нестационарных условий. Также важную роль играет диаметр трубопроводов, а именно, при выборе трубопроводов большего диаметра нестационарные эффекты проявляются в разы сильнее.

Таким образом, снижение нестационарных эффектов в криогенных магистралях возможно путем оптимизации значений диаметра магистрали или увеличением времени нестационарного процесса.

Время срабатывания запорной и регулировочной арматуры КТС находится в достаточно широком диапазоне 0,8…10 с. Исходя из расчетно-экспериментальных данных (рис. 5, 6), при времени нестационарного процесса 5 с и более, влиянием эффекта гидродинамической нестационарности можно пренебречь. Однако при более скоротечных процессах следует найти другие методы снижения нестационарного воздействия. Как мы уже говорили выше, нестационарные воздействия могут привести к вскипанию жидкого метана и снижению кавитационного запаса ТН. Рост коэффициента теплоотдачи более 2-х раз, и рост коэффициента гидравлического сопротивления более 3-х раз являются неприемлемыми условиями эксплуатации КТС.

Исходя из вышесказанного, при проектировании КТС следует применять трубопроводы с наименьшим диаметром. Так, при диаметре трубопровода 5 мм нестационарный эффект ограничен 25–30% при времени процесса 1 с. В случае, если такое конструктивное решение ограничено, то следует применять ПН с существенным запасом по мощности.

Результаты приведенного исследования являются попыткой оценить влияние нестационарных явлений в криогенных топливных магистралях и показать масштабность научной проблемы. Данные для инженерных расчетов и проектирования криогенных систем требуют

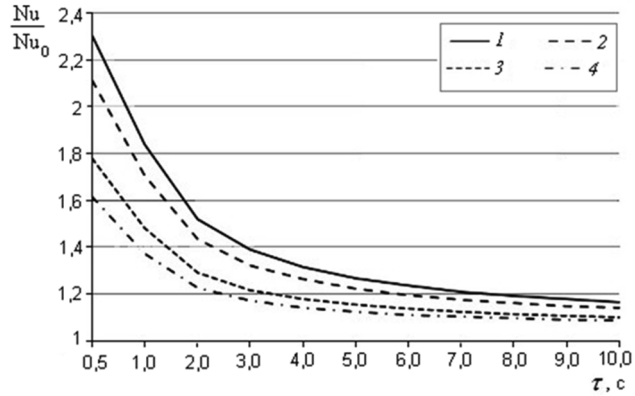

Рис. 5. Влияние ускорения потока на коэффициент теплоотдачи в КТС для различных диаметров каналов: 1 — 50 мм; 2 — 30 мм; 3 — 10 мм; 4 — 5 мм

Fig. 5. The effect of flow acceleration on heat-transfer coefficient of cryogenic fuel system for various diameters of the channels: 1 — 50 mm; 2 — 30 mm; 3 — 10 mm; 4 — 5 mm

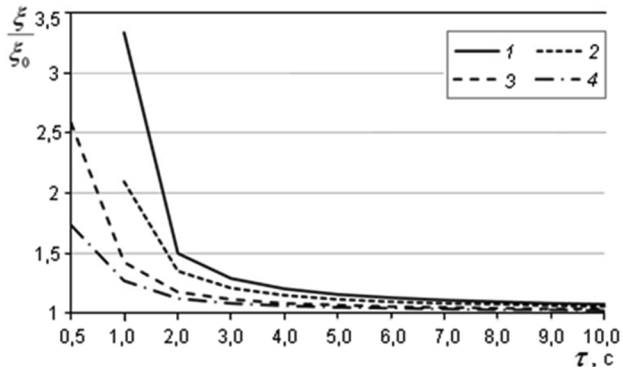

Рис. 6. Влияние ускорения потока на коэффициент гидравлического сопротивления в КТС для различных диаметров каналов: 1 — 50 мм; 2 — 30 мм; 3 — 10 мм; 4 — 5 мм

Fig. 6. The effect of flow acceleration on hydraulic resistance coefficient of cryogenic fuel system for various diameters of the channels: 1 — 50 mm; 2 — 30 mm; 3 — 10 mm; 4 — 5 mm

более детальных как экспериментальных, так и теоретических исследований. Причем такие исследования должны проводиться преимущественно на криогенных жидкостях.

Заключение

На основании проведенного исследования, можно заключить, что нестационарные гидродинамические процессы играют важную роль в переходных режимах работы криогенных топливных систем. В работе получены результаты, показывающие существенный рост коэффициентов теплоотдачи и гидравлического сопротивления в момент вывода двигателя на взлетный режим. Причиной такого изменения является перестройка структуры турбулентного течения в гидродинамически нестационарных условиях. Коэффициент теплоотдачи может превышать значения, рассчитанные по стационарным зависимостям более 2-х раз, а коэффициент гидравлического сопротивления — более 3-х раз. Указанное отличие приводит к существенным нарушениям работы всей криогенной топливной системы, и может привести к отказам в работе. Результаты расчетов авторов показывают границы применимости квазистационарного подхода в зависимости от времени срабатывания топливной арматуры и диаметра топливных магистралей. В качестве решения, предлагается при нестационарных процессах продолжительностью менее 5 с уменьшать диаметр топливопроводов и/или увеличивать мощность подкачивающих насосов.

Авторы считают необходимым проведение дальнейших исследований в области нестационарных течений криогенных жидкостей для создания расчетных инженерных моделей.

Литература

1. *Грядунов К. И.* Сравнительный анализ показателей качества авиационных керосинов, биотоплив и их смесей / К. И. Грядунов, А. Н. Козлов, В. М. Самойленко, Ш. Ардеширi // Научный вестник МГТУ ГА. 2019. Т. 22. № 5. С. 67–75.
2. Airbus. Hydrogen. An important pathway to our zero-emission ambition [Электронный ресурс]: URL: https://www.airbus.com/innovation/zero-emission/hydrogen. html (дата обращения: 10.10.2020).
3. *Ausilio Bauen; Niccolò Bitossi; Lizzie German, Anisha Harris; Khangzhen Leow.* Sustainable Aviation Fuels // Johnson Matthey Technology Review. 2020. V. 64. No 3, P. 263–278.
4. ЦИАМ. Крылья Родины. 2018. № 5–6. [Электронный ресурс]: URL: https://ciam.ru/Крылья%20Родины%205-6_2018%20Круглый%20стол%20Криогенные%20технологии.pdf (дата обращения: 10.10.2020).
5. *Daily I. W.* Resistance coefficients for accelerated and decelerated flow through smooth tubes and orifices / W. L. Daily, W. L. Hanrew, K. W. Olive, J. M. Jordan J. M // Trans. ASME. 1956. V. 78. No 9. P. 1071–1077.
6. *Sparrow E., Siegel R.* Unsteady turbulent heat transfer in tubes // Trans. ASME. Ser. C. Journal of Heat Transfer. 1960. V. 82. No 3. P. 170–180.
7. *Лийв У. Р.* О гидравлических закономерностях при ускоренном движении жидкости в напорном цилиндрическом трубопроводе // Труды Таллиннского политехнического института. Серия А. 1965. № 223. С. 43–50.
8. *Graham R. W., Deissler R. G.* Prediction of flow acceleration effect an turbulent heat transfer // Trans. ASME. Ser. C. Journal of Heat Transfer. 1967. V. 8a. No 4. P. 54–67.
9. *Галицейский Б. М.* Экспериментальное исследование нестационарного теплообмена в трубе при изменении расхода газа / Б. М. Галицейский, Г. А. Дрейцер, В. Г. Изосимов, Э. К. Калинин, В. К. Кошкин / Изв. АН БССР. Сер. Физико-технических наук. 1967. № 2. С. 56–64.
10. *Галицейский Б. М.* Нестационарный теплообмен в трубе при изменении теплового потока и расхода газа / Б. М. Галицейский, Г. А. Дрейцер, В. Г. Изосимов, Э. К. Калинин, В. К. Кошкин // Теплофизика высоких температур. 1967. Т. 5. № 5. С. 867–876.
11. *Koshkin V. K.* Experimental study nonsteady convective heat transfer in tubes / V. K. Koshkin, E. K. Kalinin, G. A. Dreitser,

References

1. Gryadunov K. I. Comparative analysis of the quality indicators of aviation kerosene, biofuels and their mixtures / K. I. Gryadunov, A. N. Kozlov, V. M. Samoylenko, Sh. Ardeshiri. *Scientific Bulletin of MSTU GA*. 2019. Vol. 22. No. 5. pp. 67–75. (in Russian)
2. Airbus. Hydrogen. An important pathway to our zero-emission ambition [Electronic resource]: URL: https://www.airbus.com/innovation/zero-emission/hydrogen. html (accessed: 10.10.2020).
3. Ausilio Bauen; Niccolò Bitossi; Lizzie German, Anisha Harris; Khangzhen Leow. Sustainable Aviation Fuels. *Johnson Matthey Technology Review*. 2020. V. 64. No 3. P. 263–278.
4. CIAM. Wings of the Motherland. 2018. No 5–6. [Electronic resource]: URL: https://ciam.ru/Крылья%20Родины%205-6_2018%20Круглый%20стол%20Криогенные%20технологии.pdf (accessed: 10.10.2020). (in Russian)
5. Daily I. W. Resistance coefficients for accelerated and decelerated flow through smooth tubes and orifices / W. L. Daily, W. L. Hanrew, K. W. Olive, J. M. Jordan J. M. *Trans. ASME*. 1956. V. 78. No 9. P. 1071–1077.
6. Sparrow E., Siegel R. Unsteady turbulent heat transfer in tubes. *Trans. ASME. Ser. C. Journal of Heat Transfer.* 1960. V. 82. No 3. P. 170–180.
7. Liiv U. R. On hydraulic regularities in the accelerated movement of liquid in a pressure cylindrical pipeline. *Proceedings of the Tallinn Polytechnic Institute.* Series A. 1965. No. 223. pp. 43–50. (in Russian)
8. Graham R. W., Deissler R. G. Prediction of flow acceleration effect an turbulent heat transfer. *Trans. ASME. Ser. C. Journal of Heat Transfer.* 1967. V. 8a. No 4. P. 54–67.
9. Galitseyskiy B. M. Experimental study of non-stationary heat transfer in a pipe when changing the gas flow rate / B. M. Galitseyskiy, G. A. Dreitzer, V. G. Izosimov, E. K. Kalinin, V. K. Koshkin. *Izv. AN BSSR. Ser. Physical and Technical Sciences.* 1967. No. 2. pp. 56–64. (in Russian)
10. Galitseyskiy B. M. Non-stationary heat transfer in a pipe when changing the heat flow and gas flow rate / B. M. Galitseyskiy, G. A. Dreitzer, V. G. Izosimov, E. K. Kalinin, V. K. Koshkin. *Thermophysics of high temperatures.* 1967. Vol. 5 No. 5. P. 867–876. (in Russian)
11. Koshkin V. K. Experimental study nonsteady convective heat transfer in tubes / V. K. Koshkin, E. K. Kalinin, G. A. Dreitser,

B. M. Galitseyski, V. G. Izosimov // Int. J. Heat and Mass Transfer. 1970. V. 13. No 8. P. 1271–1281.

12. *Kawamura H.* Experimental and analytical study of transient heat transfer for turbulent flow in a circular tube // Int. J. Heat Mass Transfer. 1977. V. 20. P. 443–480.
13. *Марковский П. М., Малолетов И. Л., Четырин В. Ф.* Исследование турбулентной структуры стационарных и нестационарных потоков газа в трубе // В сборнике: Теплообмен в авиационной технике. М.: Изд. МАИ, 1984. С. 8–12.
14. *Dreitser G. A.* Experimental Study of Effect of Hydrodinamic Unsteadinesson a Turbulent Tube Gas Flow Structures and Heat Transfer / G. A. Dreitser, V. B. Bukharkin, V. M. Kraev, A. S. Neverov // Heat Transfer. Proc. of the ll-th Int. Heat and Mass Transfer Conf. August 23–28. 1998. V. 3. P. 93–95.
15. *Kalinin E. K., Dreitser G. A.* Unsteady Convective Heat Transfer in Channels // Advances in Heat Transfer. 1994. V. 25. P. 1–150.
16. *Дрейцер Г. А., Краев В. М.* О влиянии гидродинамической нестационарности на структуру потока, коэффициенты теплоотдачи и гидравлического сопротивления при турбулентном течении теплоносителя в трубе // Теплофизика высоких температур. 2004. Т. 48. № 3. С. 442–448.
17. *Дрейцер Г. А., Краев В. М.* Исследование структуры турбулентных течений, теплообмена и гидродинамики в условиях гидродинамической нестационарности // Известия РАН. Энергетика. 2006. № 4. С. 131–144.
18. *Краев В. М.* Современное состояние исследований нестационарных турбулентных течений // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. № 4. С. 61–67.
19. *Валуева Е. П., Попов В. Н.* Нестационарное турбулентное течение жидкости в круглой трубе // Известия Академии наук СССР. Механика жидкости и газа. 1993. № 5. С. 150–157.
20. *Valueva E. P., Popov V. N., Romanova S. Yu.* Numerical simulation of processes of heat transfer and hydrodynamucs under conditions of liquid flow rate increasing with time // High Temperature. 1996. Vol. 34. no 4. C. 546–554.
21. *Валуева Е. П.* Гидродинамика и теплообмен при турбулентном течении жидкости в трубе в условиях монотонного изменения расхода во времени // Теплофизика высоких температур. 2005. Т. 43. № 2. С. 212–222.
22. *Iguchi M., Ohmi M.* Turbulent accelerating and decelerating pipe flows in quasisteady motion // Technol. Repst. Osaka Univ. 1983. V. 33. no 1696. P. 97–107.
23. *Фалий В. Ф.* Нестационарный конвективный теплообмене в трубе // Теплоэнергетика. 1991. № 3. С. 43–47.
24. *Greenblatt D., Moss E. A.* Rapid Transition to Turbulence in Pipe Flows Accelerated // Journal of Fluids Engineering. 2003. No 125 (6). P. 1072–1075.
25. *Greenblatt D., Moss E. A.* Rapid temporal acceleration of a turbulent pipe flow // J. Fluid Mech. 2004. V. 514. P. 65–75.
26. *Kraev V., Myakochin A.* The unsteady turbulent flows structure study present status // INCAS Bulletin. 2019. V. 11. I. 2. P. 111–124.
27. *Краев В. М., Мякочин А. С.* Анализ структуры гидродинамически нестационарного турбулентного течения в каналах энергоустановок летательных аппаратов // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2017. № 2. С. 75–81.
28. *Bongwan Jeong, Jae Hwa Lee.* Turbulence in temporally decelerating pipe flows // Journal of the Korean Society of Visualization. 2016. V. 14. I. 1. P. 46–50.
29. *Деревич И. В.* О моделировании нестационарной гидродинамики при турбулентном течении в трубах // Теплофизика высоких температур. 2005. Т. 43. № 2. С. 231–248.

B. M. Galitseyski, V. G. Izosimov. *Int. J. Heat and Mass Transfer.* 1970. V. 13. No 8. P. 1271–1281.

12. Kawamura H. Experimental and analytical study of transient heat transfer for turbulent flow in a circular tube. *Int. J. Heat Mass Transfer.* 1977. V. 20. P. 443–480.
13. Markovsky P. M., Maloletov I. L., Chetrin V. F. Investigation of the turbulent structure of stationary and non-stationary gas flows in a pipe. *Collection of Heat transfer in aeronautical engineering.* M.: Izd. MAI 1984. Pp. 8–12. (in Russian)
14. Dreitser G. A. Experimental Study of Effect of Hydrodinamic Unsteadinesson a Turbulent Tube Gas Flow Structures and Heat Transfer / G. A. Dreitser, V. B. Bukharkin, V. M. Kraev, A. S. Neverov. *Heat Transfer. Proc. of the ll-th Int. Heat and Mass Transfer Conf.* August 23–28. 1998. V. 3. P. 93–95.
15. Kalinin E. K., Dreitser G. A. Unsteady Convective Heat Transfer in Channels. *Advances in Heat Transfer.* 1994. V. 25. P. 1–150.
16. Dreitzer G. A., Kraev V. M. On the influence of hydrodynamic unsteadiness on the flow structure, heat transfer coefficients and hydraulic resistance in the turbulent flow of a coolant in a pipe. *Thermophysics of high temperatures.* 2004. Vol. 48. No. 3. P. 442–448. (in Russian)
17. Dreitzer G. A., Kraev V. M. Investigation of the structure of turbulent flows, heat transfer and hydrodynamics in the conditions of hydrodynamic unsteadiness. *Izvestiya RAS. Power engineering.* 2006. No. 4. P. 131–144. (in Russian)
18. Kraev V. M. The current state of research on unsteady turbulent flows. *Bulletin of the Moscow Aviation Institute.* 2016. T. 23. No. 4. P. 61–67. (in Russian)
19. Valueva E. P., Popov V. N. Unsteady turbulent flow of liquid in a round pipe. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Fluid and gas mechanics.* 1993. No. 5. P. 150–157. (in Russian)
20. Valueva E. P., Popov V. N., Romanova S. Yu. Numerical simulation of processes of heat transfer and hydrodynamucs under conditions of liquid flow rate increasing with time. *High Temperature.* 1996. vol. 34. no 4. C. 546–554.
21. Valueva E. P. Hydrodynamics and heat transfer in the turbulent flow of liquid in a pipe under conditions of monotonous flow rate changes over time. *Thermophysics of high temperatures.* 2005, vol. 43, no. 2, pp. 212–222. (in Russian)
22. Iguchi M., Ohmi M. Turbulent accelerating and decelerating pipe flows in quasisteady motion. *Technol. Repst. Osaka Univ.* 1983. V. 33. no 1696. P. 97–107.
23. Faliy V. F. Unsteady convective heat exchange in a pipe. *Teploenergetika.* 1991. No. 3. p. 43–47. (in Russian)
24. Greenblatt D., Moss E. A. Rapid Transition to Turbulence in Pipe Flows Accelerated. *Journal of Fluids Engineering.* 2003. No 125 (6). P. 1072–1075.
25. Greenblatt D., Moss E. A. Rapid temporal acceleration of a turbulent pipe flow. *J. Fluid Mech.* 2004. V. 514. P. 65–75.
26. Kraev V., Myakochin A. The unsteady turbulent flows structure study present status. *INCAS Bulletin.* 2019. V. 11. I. 2. P. 111–124.
27. Kraev V. M., Myakochin A. S. Analysis of the structure of hydrodynamically unsteady turbulent flow in the channels of power installations of aircraft. *News of higher educational institutions. Aviation equipment.* 2017. No. 2. p. 75–81. (in Russian)
28. Bongwan Jeong, Jae Hwa Lee. Turbulence in temporally decelerating pipe flows. *Journal of the Korean Society of Visualization.* 2016. V. 14. I. 1. P. 46–50.
29. Derevich I. V. On modeling of unsteady hydrodynamics in turbulent flow in pipes. *Thermophysics of high temperatures.* 2005. Vol. 43. No. 2. p. 231–248. (in Russian)

30. *Derevich I. V.* Relative particle velocity in a turbulent flow // Fluid Dynamics. 2008. vol. 43. no 3. p. 357–368.
31. *Shuisheng H., Ariyaratne C., Vardy A. E.* Wall shear stress in accelerating turbulent pipe flow // Journal of Fluid Mechanics. 2011. V. 68 (5). P. 440–460.
32. *Shuisheng H., Ariyaratne C., Vardy A. E.* Wall friction and turbulence dynamics in decelerating pipe flows // Journal of Hydraulic Research. 2010. V. 48 (6). P. 810–821.
33. *Shuisheng H., Ariyaratne C., Vardy A. E.* A computational study of wall friction and turbulence dynamics in accelerating pipe flow // Computers & Fluids. 2008. V. 37 (6). P. 674–689.
34. *Akshat M.* Temporal acceleration of a turbulent channel flow / Akshat M., Som G., Shuisheng H., Show H // Journal of Fluid Mechanics. 2017. V. 835. P. 471–490.
35. *Shuisheng H.* Experimental study and large eddy simulation of accelerating flow from an initial turbulent flow / H. Shuisheng, M. Akshat, S. Mehdi, G. Som // 10th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena (TSFP). July 6–9, 2017, Chicago-IL, USA. 2017. V. 6. C-5. P. 1–6.
36. *Stefan Fechter, Tim Horchler, Sebastian Karl, Klaus Hannemann.* Numerical simulation of cryogenic flows under high-pressure conditions. // 17th International Conference on Numerical Combustion. 06–08. May 2019. Aachen, Germany. 2019. P. 141
37. *Fechter S., Horchler T., Karl S.* Efficient Handling of Cryogenic Equation of State for the Simulation of Rocket Combustion Chambers // In book: Non-Ideal Compressible Fluid Dynamics for Propulsion and Power 2020. P. 19–30.
38. *Haemisch J., Suslov D.* Experimental Investigations of Heat Transfer Processes in Cooling Channels for Cryogenic Hydrogen and Methane at Supercritical Pressure // In book: Non-Ideal Compressible Fluid Dynamics for Propulsion and Power. 2020. P. 3–16.
39. *Ohira K., Nakayama T., Takahashi K.* Pressure Drop and Heat Transfer Characteristics of Boiling Nitrogen in Square Pipe flow // Physics Procedia. 2015. V. 67. P. 675–680.
40. *Krayev V. M.* Heat Exchange and Hydrodynamics of Turbulent Flows under Conditions of Hydrodynamic Nonstationarity // Russian Aeronautics. 2005. no 3. P. 39–42.
41. *Марков С. Б.* Экспериментальное исследование скоростной структуры и гидравлических сопротивлений в неустановившихся напорных турбулентных потоках // Механика жидкости и газа. 1973. № 2. С. 65–75.
42. *Никифоров А. Н., Герасимов С. В.* Изменение параметров турбулентного течения при ускорении и замедлении потока // Инженерно-физический журнал. 1985. № 49 (4). С. 533–539.

30. Derevich I. V. Relative particle velocity in a turbulent flow. *Fluid Dynamics.* 2008. vol. 43. no 3. p. 357–368.
31. Shuisheng H., Ariyaratne C., Vardy A. E. Wall shear stress in accelerating turbulent pipe flow. *Journal of Fluid Mechanics.* 2011. V. 68 (5). P. 440–460.
32. Shuisheng H., Ariyaratne C., Vardy A. E. Wall friction and turbulence dynamics in decelerating pipe flows. *Journal of Hydraulic Research.* 2010. V. 48 (6). P. 810–821.
33. Shuisheng H., Ariyaratne C., Vardy A. E. A computational study of wall friction and turbulence dynamics in accelerating pipe flow. *Computers & Fluids.* 2008. V. 37 (6). P. 674–689.
34. Akshat M. Temporal acceleration of a turbulent channel flow / Akshat M., Som G., Shuisheng H., Show H. *Journal of Fluid Mechanics.* 2017. V. 835. P. 471–490.
35. Shuisheng H. Experimental study and large eddy simulation of accelerating flow from an initial turbulent flow / H. Shuisheng, M. Akshat, S. Mehdi, G. Som. *10th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena (TSFP).* July 6–9, 2017, Chicago-IL, USA. 2017. V. 6. C-5. P. 1–6.
36. Stefan Fechter, Tim Horchler, Sebastian Karl, Klaus Hannemann. Numerical simulation of cryogenic flows under high-pressure conditions. *17th International Conference on Numerical Combustion.* 06–08. May 2019. Aachen, Germany. 2019. P. 141
37. Fechter S., Horchler T., Karl S. Efficient Handling of Cryogenic Equation of State for the Simulation of Rocket Combustion Chambers. *In book: Non-Ideal Compressible Fluid Dynamics for Propulsion and Power.* 2020. P. 19–30.
38. Haemisch J., Suslov D. Experimental Investigations of Heat Transfer Processes in Cooling Channels for Cryogenic Hydrogen and Methane at Supercritical Pressure. *In book: Non-Ideal Compressible Fluid Dynamics for Propulsion and Power.* 2020. P. 3–16.
39. Ohira K., Nakayama T., Takahashi K. Pressure Drop and Heat Transfer Characteristics of Boiling Nitrogen in Square Pipe flow. *Physics Procedia.* 2015. V. 67. P. 675–680.
40. Krayev V. M. Heat Exchange and Hydrodynamics of Turbulent Flows under Conditions of Hydrodynamic Nonstationarity. *Russian Aeronautics.* 2005. no 3. P. 39–42.
41. Markov S. B. Experimental study of the velocity structure and hydraulic resistances in unsteady pressure turbulent flows. *Mechanics of liquid and gas.* 1973. No. 2. P. 65–75. (in Russian)
42. Nikiforov A. N., Gerasimov S. V. Changes in the parameters of turbulent flow during acceleration and deceleration of the flow. *Engineering-physical Journal.* 1985. No. 49 (4). pp. 533–539. (in Russian)

Сведения об авторах

Краев Вячеслав Михайлович
Д. т. н., доцент, профессор кафедры «Авиационно-космическая теплотехника», Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), 125993, Москва, Волоколамское шоссе, 4, kraevvm@mail.ru

Асланов Асвар Раминович
Аспирант кафедры «Авиационно-космическая теплотехника», Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), 125993, Москва, Волоколамское шоссе, 4, asvar.aslanov96@mail.ru

Information about authors

Kraev Viacheslav M.
D. Sc., Associate Professor, Professor of the Department of «Aerospace Heat Engineering», Moscow Aviation Institute (National Research University), 4, Volokolamsk Highway, Moscow, 125993, Russia, kraevvm@mail.ru

Aslanov Asvar R.
Postgraduate of the Department of «Aerospace Heat Engineering», Moscow Aviation Institute (National Research University), 4, Volokolamsk Highway, Moscow, 125993, Russia, asvar.aslanov96@mail.ru