

**Разработка новой конструктивной схемы форсунки
с наружной рубашкой охлаждения
для авиационных воздушно-реактивных двигателей
и наземных энергоустановок**

© В.А. Алтунин¹, К.В. Алтунин¹, М.А. Абдуллин¹, Ю.Ф. Гортышов¹,
К.А. Пронин¹, А.А. Юсупов¹, М.Л. Яновская²

¹КНИТУ им. А.Н. Туполева — КАИ, Казань, 420111, Российская Федерация
²ЦИАМ им. П.И. Баранова, Москва, 111116, Российская Федерация

Представлены результаты анализа эксплуатации штатной топливной форсунки воздушно-реактивного двигателя марки НК-8-2У, ресурс которой ограничивается негативным процессом осадкообразования и составляет 900 ч (циклов) работы. Проанализированы изложенные в научно-технической и патентно-лицензионной литературе сведения о форсунках и горелочных устройствах на жидких углеводородных горючих, сделан вывод о том, что в их конструктивных схемах отсутствуют какие-либо существующие и перспективные способы борьбы с осадкообразованием. Показаны результаты экспериментов с углеводородными горючими и охладителями, на основе которых авторами были созданы и запатентованы новые способы контроля осадкообразования и борьбы с ним. Обобщены и классифицированы существующие и перспективные способы борьбы с осадкообразованием в двигателях летательных аппаратов и наземных энергоустановках. Дано обоснование необходимости создания новой конструктивной схемы топливной форсунки с улучшенными характеристиками, такими как ресурс, надежность и эффективность. На базе штатной топливной форсунки воздушно-реактивного двигателя марки НК-8-2У разработана и запатентована новая конструктивная схема перспективной форсунки с наружной рубашкой охлаждения, в которой внедрены результаты экспериментальных исследований и новые способы борьбы с осадкообразованием. Проведен сравнительный анализ ресурсов безотказной, надежной и безопасной работы обеих форсунок. Установлено, что ресурс новой форсунки может быть увеличен в 2 раза и более по сравнению со штатной форсункой воздушно-реактивного двигателя или наземной газотурбинной энергоустановки.

Ключевые слова: *система топливоподачи, форсунка, воздушно-реактивный двигатель летательного аппарата, наземная энергоустановка, жидкое и газообразное углеводородное горючее, вынужденная конвекция, тепловой процесс, температура, давление, скорость прокачки, осадкообразование, способы борьбы с осадкообразованием*

Введение. Известно, что при эксплуатации воздушно-реактивных двигателей (ВРД), газотурбинных двигателей (ГТД) и энергоустановок (ЭУ) на жидких углеводородных горючих (УВГ) и охладителях (УВО) происходит сокращение ресурса и возникают аварийные ситуации из-за негативного процесса осадкообразования в форсунках [1–24]. Например, форсунки ГТД марки НК-8-2У самолета Ту-154 через 900 ч (циклов) эксплуатации полностью закоксовываются [8–28], в результате

чего могут происходить различные аварийные ситуации, связанные с потерей тяги, образованием течи топлива, пожаром и взрывом. Частичное закоксовывание форсунок может привести к потере тяги, а небольшое закоксовывание только одной форсунки — к нерасчетному струйному распылу, прогару жаровой трубы, пожару и взрыву.

Штатная форсунка ГТД марки НК-8-2У [8, 9] показана на рис. 1 до начала эксплуатации, распылитель форсунки изображен в разрезе и с увеличением, форсуночный фильтр тоже увеличен. Отчетливо видно, что все детали форсунки являются чистыми и не имеют твердых углеродистых отложений. И та же штатная форсунка ГТД марки НК-8-2У [8, 9] после 900 ч (циклов) эксплуатации приведена на рис. 2, где видно, что все детали форсунки полностью покрыты твердым углеродистым осадком. Жидкое УВГ уже не может распыляться через такую форсунку.



Рис. 1. Штатная форсунка ГТД марки НК-8-2У до начала эксплуатации

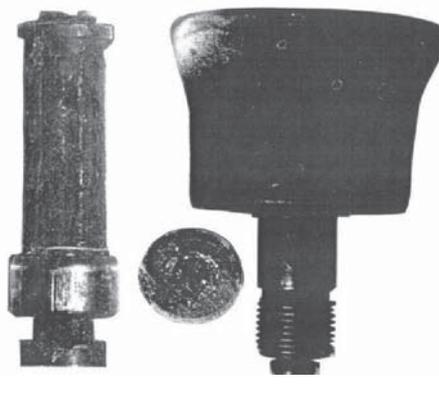


Рис. 2. Штатная форсунка ГТД марки НК-8-2У после 900 ч (циклов) эксплуатации

Газотурбинные двигатели марки НК-8-2У также устанавливают в качестве базовых двигателей на различных экранопланах, на судах с воздушной подушкой [8]. Данные ГТД, в том числе и конверсионные, широко применяются как наземные ЭУ для разогрева и добычи битумной нефти, обеспечения перекачки природного газа по трубам на разные расстояния на станциях газоперекачки, для исследования горячей плазмы, в качестве стационарных электростанций, теплостанций и др. [8]. На станциях газоперекачки такие ЭУ в основном работают на газообразном метане, но в экстренных ситуациях можно использовать и жидкие углеводородные горючие.

В жидких УВГ и УВО на нагреваемых металлических деталях форсунки образуется твердый углеродистый осадок, его цвет — от светло-коричневого до темно-коричневого и черного.

В газообразном метане негативный процесс осадкообразования на нагреваемых металлических поверхностях начинается при температуре 550К. Скорость осадкообразования в газообразном метане в 10 раз меньше, чем в жидких УВГ и УВО. Слой углеродистого осадка на нагреваемых деталях форсунки в газообразном метане имеет рыхлую, или «бархатную», структуру; цвет осадка — светло-серый. Увеличение коэффициента теплоотдачи к газообразному метану в условиях естественной конвекции в замкнутом объеме происходит при повышении давления, а в условиях вынужденной конвекции — еще и при увеличении массовой скорости прокачки.

Ресурс штатной форсунки ГТД марки НК-8-2У показан на рис. 3. Из графика видно, что эта форсунка является работоспособной только 900 ч (циклов), а далее такой ГТД необходимо направить на авиационный завод для проведения капитального ремонта [8].

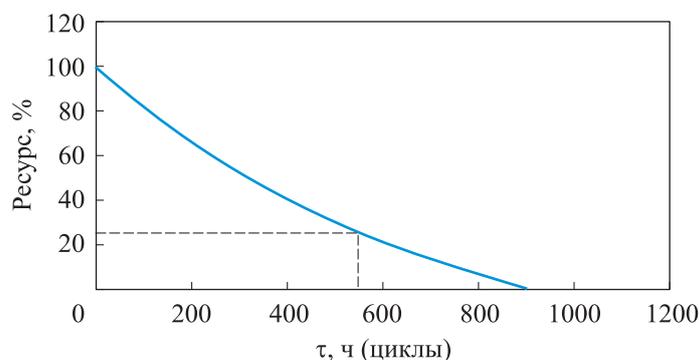


Рис. 3. Ресурс штатной форсунки ГТД марки НК-8-2У

Одним из существующих способов борьбы с осадкообразованием, а точнее — его предотвращения в жидких УВГ и УВО является внедрение различных присадок на нефтеперерабатывающих заводах [8, 12–14]. Однако эти присадки предотвращают осадкообразование только до температуры 473К, а при дальнейшем повышении нагрева металлической стенки, например стенки форсунки, твердый осадок появляется, растет и выводит форсунку и весь двигатель или ЭУ из строя. Твердый углеродистый осадок появляется практически на всех стенках деталей форсунки, которые контактируют с жидким УВГ или УВО, т. е. на стенках входных каналов форсунки, выходного канала распылителя форсунки, на топливном сетчатом фильтре.

Существующие топливные форсунки практически не имеют никакой защиты от осадкообразования. Поэтому необходимо бороться с этим очень опасным и негативным процессом уже при создании форсунок и самих двигателей и ЭУ на жидких и газообразных УВГ и УВО. Гораздо легче, безопаснее и экономически выгоднее вести борьбу с осадкообразованием на ранней стадии проектирования, расчета

и создания двигателей и ЭУ, чем заниматься их очисткой в ходе эксплуатации — без разборки двигателей и ЭУ или с их разборкой и ремонтом либо заменой в заводских условиях.

Штатную форсунку ГТД марки НК-8-2У можно защитить от осадкообразования разными способами. Среди перспективных можно выделить новый способ предотвращения осадка путем охлаждения нагреваемых деталей до температуры 373К и ниже [8–17]. При данной температуре осадкообразования не происходит.

В ходе работы ГТД марки НК-8-2У вся форсунка нагревается до температуры 973К. Если суметь защитить форсунку от сильного нагрева и снизить температуру стенки форсунки и ее деталей до 373К и ниже, то твердый углеродистый осадок уже не будет осаждаться. В результате можно значительно увеличить ресурс штатной форсунки ГТД марки НК-8-2У.

Для увеличения ресурса новых форсунок предлагается модернизировать штатную форсунку следующим образом: на отражателе штатной форсунки конструктивно расположить наружную рубашку охлаждения регенеративной или отдельной системы охлаждения. Конструктивная схема новой форсунки по степени и качеству распыла горючего не будет отличаться от штатной. Главное преимущество новой форсунки будет заключаться в том, что ее ресурс безопасной и безаварийной работы увеличится в 2 раза и более.

Конструкция и геометрические размеры отражателя штатной форсунки позволяют расположить на нем наружную рубашку охлаждения отдельного или регенеративного типа. Это не вызовет изменения размеров внутренних деталей штатной форсунки и даст возможность эффективно охлаждать не только отражатель, но и все детали форсунки, что, в свою очередь, позволит уменьшить скорость осадкообразования и увеличить ресурс, надежность и безопасность форсунки.

Наличие наружной рубашки охлаждения, конечно, приведет к дополнительным изменениям штатной системы топливоподачи к форсункам всего двигателя, но увеличение ресурса, надежности, безопасности и эффективности форсунки все-таки важнее.

Цель данной статьи — на базе штатной форсунки ГТД марки НК-8-2У разработать новую конструктивную схему форсунки с улучшенными характеристиками, в которую введены новые перспективные способы борьбы с осадкообразованием.

Для достижения данной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести экспериментальные исследования негативного процесса осадкообразования в жидких и газообразных УВГ и УВО;
- разработать новые способы борьбы с осадкообразованием в двигателях и ЭУ на жидких и газообразных УВГ и УВО;

– применить результаты экспериментальных исследований и различных существующих и перспективных способов борьбы с осадкообразованием при разработке и создании новых конструктивных схем форсунок, в том числе с наружной рубашкой охлаждения, у которых будут улучшены такие важные характеристики, как ресурс, надежность, эффективность, безопасность, экономичность и экологичность.

Для более полного представления о проблемах осадкообразования в топливных форсунках и способах борьбы с этим негативным явлением необходимо провести обзор и анализ научно-технической и патентно-лицензионной литературы.

Анализ результатов поиска научно-технической и патентно-лицензионной литературы и результатов проведения экспериментальных исследований по теме статьи. Анализ научно-технической литературы, а также результатов экспериментальных исследований, проведенных авторами данной статьи с жидкими и газообразными УВГ и УВО, показали, что осадкообразование зависит от следующих факторов [1–28]:

$$\delta_{ос} = f(T_{ст}; T_{ж}; p; W; M; П; K_{шер}, K_0; K_{ин}; X; N; \Gamma; E; \tau),$$

где $T_{ст}$ — температура стенки (канала со стороны УВГ, УВО); $T_{ж}$ — температура жидкого УВГ, УВО; p — давление в топливно-охлаждающей системе; W — скорость прокачки УВГ, УВО; M — материал стенки; $П$ — присадки; $K_{шер}$ — степень шероховатости поверхности; K_0 — насыщенность кислородом; $K_{ин}$ — насыщенность инертными газами; X — вид УВГ (УВО), его физико-химические и физико-технические характеристики и свойства; N — число циклов работы энергетической установки многократного использования; Γ — геометрические характеристики внутренних узлов топливно-охлаждающих систем (расстояния между деталями, габариты выемок (лунок) и т. д.); E — электростатические поля; τ — время наработки.

Негативный процесс осадкообразования в жидких УВГ и УВО, т. е. процесс их термического разложения, начинается при нагреве горючего и охладителя до температуры 373К и выше. Негативный процесс осадкообразования на нагреваемых металлических деталях форсунки, контактирующих с жидким УВГ или УВО, начинается при нагреве данных деталей также до температуры 373К и выше, при этом температура самого жидкого УВГ или УВО может быть ниже данной температуры.

При температуре металлических деталей форсунки и жидкого УВГ или УВО ниже 373К осадок на их поверхностях не образуется. Это явление легло в основу разработанного авторами нового и перспективного способа предотвращения образования твердого углеродистого осадка на нагреваемой металлической поверхности, который был

включен в общую классификацию способов и методов борьбы с осадкообразованием в жидких и газообразных УВГ и УВО.

Снизить температуру стенок форсунки до 373К и менее можно при увеличении скорости прокачки жидкого УВГ или УВО, а также путем повышения давления. В зоне критического давления в жидких УВГ и УВО из-за особенностей теплофизических свойств (ТФС) коэффициент теплоотдачи увеличивается в 2-3 раза; этот эффект возможно использовать при интенсификации теплоотдачи к жидким углеводородным горючим и охладителям в нагреваемых топливных каналах, в рубашках охлаждения, что будет способствовать уменьшению или предотвращению осадкообразования в конкретных конструктивных схемах двигателей и ЭУ (например, для жидкого УВГ и УВО марки ТС-1 зона критического давления $p_{кр} = 1,6...2,2$ МПа). С учетом этих эффектов авторы разработали еще один способ уменьшения и предотвращения образования твердых углеродистых осадков на нагреваемых металлических поверхностях, который также был включен в общую классификацию способов и методов борьбы с осадкообразованием в жидких УВГ и УВО.

Металлическая поверхность с искусственной шероховатостью в виде продольных, поперечных или кольцевых конических нарезок либо винтовой конической резьбы с высотой зубьев 3...5 мм ограничивает рост слоя твердого углеродистого осадка на высоту зубьев. На базе этого явления авторами разработан и запатентован [33] новый способ ограничения роста твердого углеродистого осадка на нагреваемых металлических поверхностях, включенный в вышеупомянутую классификацию как способ ограничения роста осадка.

Авторами проведен поиск отечественных и зарубежных патентов на изобретения форсунок, способы борьбы с осадкообразованием в жидких и газообразных УВГ и УВО, а также изучены ГОСТы и другие материалы, содержащие сведения об охлаждающих жидкостях [29–51]. Патентный поиск охлаждаемых форсунок ВРД, ГТД, ЭУ показал, что информация о тепловой защите и охлаждении форсунок на жидких и газообразных УВГ и УВО различных ВРД, ГТД, ЭУ приведена в авторских свидетельствах СССР и патентах на изобретения Российской Федерации [25, 26, 35–37, 45–47]. Ниже будет показано, что описанные в этих документах форсунки являются аналогами форсунки, предлагаемой авторами статьи.

Так, в патенте [25] рассмотрена штатная форсунка ГТД марки НК-8-2У, в конструкции которой предусмотрены следующие способы уменьшения и предотвращения осадкообразования на топливном сетчатом фильтре:

1) установка теплоизоляционных и герметичных прокладок на левую и правую втулки фильтра, что позволяет ограничить его нагрев до температуры 373К и ниже, а также предотвратить появление осадка на

нем. Ресурс такой форсунки может быть увеличен не более чем в 2 раза, так как осадкообразованию будут по-прежнему подвергаться другие детали форсунки;

2) конструктивное перемещение фильтра в рабочую область с наименьшей температурой, например, в область перед входным отверстием форсунки, где можно установить второй фильтр — перед другим входным отверстием. Ресурс такой форсунки может быть увеличен не более чем в 2 раза, так как другие детали форсунки будут подвергаться осадкообразованию;

3) применение кассетных заменяемых фильтров, за счет чего ресурс форсунки может быть увеличен в 2 раза и более.

Однако в этом изобретении рассмотрены случаи предотвращения осадка только на топливном сетчатом фильтре, не рассмотрены случаи понижения температуры и предотвращения осадкообразования для всей форсунки, отсутствует рубашка охлаждения форсунки; поэтому данное изобретение может быть учтено лишь как аналог охлаждаемой форсунки, разработанной авторами данной статьи.

В патенте [26] приведена конструкция штатной форсунки ГТД марки НК-8-2У, в которой применены следующие способы уменьшения и предотвращения осадкообразования:

1) форсунка имеет несколько выходных каналов и несколько топливных сетчатых фильтров, которые расположены в индивидуальных цилиндрических топливных каналах с системой контроля за осадкообразованием, а каждый цилиндрический канал конусообразно расположен в общем коллекторе с прокачиваемым жидким или газообразным УВГ. Таким образом, обеспечивается вынужденная конвекция жидкого или газообразного УВГ, в результате чего происходит регенеративное охлаждение всех цилиндрических каналов со всеми деталями в них, включая и топливные сетчатые фильтры, которые, в свою очередь, снабжены термоизолирующими и герметичными прокладками на фланцах, что эффективно предохраняет фильтры от нагрева и появления осадка на них;

2) в области крепления к фронтальной плите форсунка снабжена теплоизоляционной прокладкой, что значительно ограничивает общий нагрев деталей форсунки, расположенных после смесительной камеры (отражателя).

Здесь не обеспечивается охлаждение стенок смесителя (отражателя), отсутствует рубашка наружного охлаждения смесителя (отражателя), из-за чего будет происходить общий нагрев остальных деталей форсунки, поэтому данное изобретение может быть рассмотрено и учтено лишь как аналог охлаждаемой форсунки, разработанной авторами данной статьи.

В патенте [35] описана жидкостная струйная форсунка. Ее охлаждение и предотвращение осадкообразования обеспечивается путем

особого расположения первой, второй и третьей подающих трубок, но конкретно не указано, как будет осуществляться предотвращение осадкообразования на всех металлических деталях и во всех сложных местах данной форсунки, до какой температуры можно охлаждать форсунку такими способами и системами охлаждения, какие при этом должны соблюдаться рабочие параметры давления и скорости прокачки жидкого охладителя. В патенте не даны возможные характеристики новой модернизированной форсунки — ресурс и время безопасной и надежной работы, сведения об их улучшении по сравнению с исходной форсункой. Сама конструкция струйной форсунки в корне отличается от рассматриваемой в данной статье штатной форсунки ГТД марки НК-8-2У, так как в ней отсутствует камера смещения (отражатель) с системой подачи воздуха, лопатками завихрителя и отражательными стенками. Таким образом, данное изобретение может быть рассмотрено и учтено лишь как аналог охлаждаемой форсунки, разработанной авторами данной статьи.

В патенте [36] рассмотрена струйная форсунка с жидкостным и газовым подающими каналами. Ее охлаждение и предотвращение осадкообразования в ней обеспечивается за счет дополнительного расположения внутри этих каналов защитных экранов. В документе не указано:

– до какой температуры можно охладить детали такой форсунки предлагаемыми защитными экранами;

– при каких значениях скорости прокачки жидкого и газообразного горючего, их первоначальной температуры и давления в топливной системе обеспечивается охлаждение всей форсунки для предотвращения осадкообразования;

– насколько увеличивается ресурс и время безопасной, надежной и безаварийной работы форсунки;

– в каком состоянии — жидком или газообразном — используется газообразное горючее;

– при каких температурах начинается негативный процесс осадкообразования на металлических деталях при использовании жидких и газообразных горючих. Сама конструкция струйной форсунки также в корне отличается от описанной в данной статье штатной форсунки ГТД марки НК-8-2У, так как в ней тоже отсутствует камера смещения или отражатель с системой подачи воздуха, с лопатками завихрителя и отражательными стенками. Таким образом, это изобретение также может быть рассмотрено и учтено лишь как аналог охлаждаемой форсунки, разработанной авторами данной статьи.

В патенте [37] описана струйная двухтопливная газовой-жидкостная форсунка с теплозащитным экраном, который образует дополнительное воздушное пространство, что приводит к уменьшению или предотвращению осадкообразования в форсунке. В документе не указано, до

какой температуры происходит охлаждение стенок топливных жидкостных и газовых каналов, какие термодинамические характеристики (давление, температура, скорость прокачки) имеют жидкостные и газовые потоки в старой и новой, модернизированной форсунке, какова эффективность новой форсунки по сравнению с первоначальной форсункой по ресурсу и времени безопасной и эффективной работы. Сама конструкция струйной форсунки также в корне отличается от рассматриваемой в данной статье штатной форсунки ГТД марки НК-8-2У, в ней отсутствует камера смешения или отражатель с системой подачи воздуха, лопатками завихрителя и отражательными стенками. Таким образом, данное изобретение также может быть рассмотрено и учтено лишь как аналог охлаждаемой форсунки, разработанной авторами данной статьи.

В патенте [45] показана конструкция форсунки для распыла вязких жидкостей в топках теплотехнических установок. В ней поступающий воздух разогревается плазмотроном до высоких температур и превращается в плазму, затем смешивается с жидким топливом, воспламеняя и испаряя его, далее топливовоздушная смесь истекает в сопло Лавала. При этом часть топлива, проходя по кольцевому каналу, охлаждает втулку смешения воздушной плазмы с топливом и смешивается с основной струей распылителя на выходе из втулки с дальнейшим поступлением в выходное сопло. Данное изобретение можно принять за прототип, но надо отметить следующие недостатки:

- отсутствует наружная рубашка охлаждения;
- не указано, какое именно жидкое горючее используется в рассматриваемой форсунке — углеводородное или неуглеводородное;
- кольцевые каналы предназначены только для охлаждения смесительной втулки поступающим жидким горючим, но не указано конкретно, до какой температуры в итоге она охлаждается;
- отсутствует даже упоминание о негативном процессе осадкообразования и о каких-либо способах борьбы с ним с целью увеличения ресурса, надежности, безопасности, экологичности и эффективности, отмечается только повышение экономичности форсунки;
- данная форсунка может использоваться только в наземных теплотехнических энергоустановках, но не в двигателях летательных аппаратов.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что данное изобретение может стать только аналогом изобретения, которое разработали авторы данной статьи.

В патенте [46] описана форсунка для распыла жидкого УВГ в ГТД, которая имеет основной и коаксиальный дополнительный каналы. Данная форсунка может прогреваться до температуры 873К, для борьбы с коксованием применяются внешнее теплоизоляционное покрытие и кожух, а также теплоизоляционное кольцо. Однако в ходе работы ГТД данная форсунка будет подвержена нагреву в зоне

выходного устройства и распылителя, что в итоге приведет к нагреву стенок форсунки до температуры более 373К, а в этих условиях при любой температуре жидкого УВГ на внутренних стенках основного канала форсунки обязательно начнется негативный процесс осадкообразования, причем скорость осадкообразования будет самой высокой в выходном канале распылителя форсунки, что в итоге приведет к ее частичной и полной закоксованности. Авторы патента не указывают, до какой температуры будут нагреваться жидкое УВГ и внутренние стенки форсунки, — они просто утверждают, что, поскольку жидкое УВГ нагреваться не будет, то и закоксовывания форсунки не будет. По информации авторов патента, эта форсунка предназначена только для распыливания жидкого УВГ. Таким образом, можно утверждать, что в данном изобретении внедрены способы замедления осадкообразования в форсунке, поэтому это изобретение может быть рассмотрено и учтено лишь как аналог охлаждаемой форсунки, разработанной авторами данной статьи.

В патенте [47] рассмотрена модернизированная двухтопливная топливоздушная форсунка ГТД, основой для которой послужила форсунка ГТД марки НК-16-18СТ. У новой форсунки корпус имеет два канала подвода топлива, во внутреннюю часть корпуса вставлена газораспределительная втулка, в центре которой установлены удлиненный сетчатый фильтр и центробежный распылитель жидкого топлива; между корпусом форсунки и корпусом завихрителя установлен струйный распылитель газа. Такая форсунка может работать на жидких и газообразных УВГ, но ее конструкция не предусматривает борьбу с осадкообразованием, поэтому данное изобретение также может быть рассмотрено и учтено лишь как аналог охлаждаемой форсунки, разработанной авторами данной статьи.

Сведения о тепловой защите и охлаждении форсунок на жидких и газообразных УВГ и УВО различных ВРД, ГТД, ЭУ приведены в иностранных заявках на изобретения и патентах, например, в патентах США [42–44].

Так, в патенте [42] описана горелка для технологических операций, связанных с обеспечением подачи окислителя и газифицированного сырья в реакционную камеру; вдоль корпуса горелки размещены каналы входа-выхода окислителя, которые частично охлаждают корпус горелки. По конструкции данная горелка в корне отличается от штатной форсунки ГТД марки НК-8-2У, но она не может применяться в двигателях летательных аппаратов. Кроме того, у нее отсутствует наружная рубашка охлаждения, а в каналах входа-выхода протекает лишь окислитель, нет даже упоминания о жидком углеводородном горючем, отсутствуют сведения о температуре нагрева и охлаждения горелки, полностью отсутствует информация о негативном процессе осадкообразования в каналах горелки и способах борьбы с ним. Таким образом,

и это изобретение может быть рассмотрено и учтено лишь как аналог охлаждаемой форсунки, разработанной авторами данной статьи.

В патенте [43] рассмотрена форсунка для горячего кислорода, которая применяется в газификаторе и в конечном процессе приготовления синтез-газа. Кислород в форсунке можно нагревать путем сжигания топливного газа, а далее нагретый кислород напрямую может воспламенять углеродистые материалы, такие как водоугольная суспензия и коксовый газ. Данная форсунка очень далека от конструктивной схемы штатной форсунки ГТД марки НК-8-2У и не может применяться в двигателях летательных аппаратов; у нее отсутствует наружная рубашка охлаждения, а боковые каналы предназначены лишь для продвижения и поставки кислорода. В документе не приведены конкретные температурные режимы форсунки и ее стенок, отсутствуют какие-либо данные о способности охлаждения форсунки боковыми каналами с кислородом, нет даже упоминания о негативном процессе осадкообразования и способах борьбы с ним. Таким образом, данное изобретение может быть рассмотрено и учтено лишь как аналог охлаждаемой форсунки, разработанной авторами данной статьи.

В патенте [44] описана газовая горелка, предназначенная для плавильных печей, в которой за счет выходного защитного сопла обеспечивается защита от повреждений и засорения частицами расплавленного металла и шлака; внутри стенки горелки вдоль ее корпуса расположены каналы охлаждения, наружная рубашка охлаждения отсутствует. Конструктивно данная горелка в корне отличается от штатной форсунки ГТД марки НК-8-2У, и ее нельзя использовать в качестве форсунки для двигателей летательных аппаратов. В горелке используется газообразное горючее. В документе не упоминается о тепловых режимах, о роли охлаждающих каналов в процессе охлаждения всей горелки, нет информации о негативном процессе осадкообразования и способах борьбы с ним. Таким образом, данное изобретение может быть рассмотрено и учтено лишь как аналог охлаждаемой форсунки, разработанной авторами данной статьи.

За ближайший аналог (прототип) новой конструкции авторами данной статьи была принята штатная форсунка ГТД марки НК-8-2У [38], поскольку именно на ней можно четко и конкретно показать направленные на борьбу с осадкообразованием пути и этапы модернизации такой топливной форсунки, а также разработки новых форсунок двигателей и ЭУ семейства «НК», в том числе путем создания наружной рубашки охлаждения форсунки с внедрением существующих и перспективных новых способов уменьшения, ограничения и предотвращения роста твердых углеродистых отложений.

Из обзора и анализа научно-технической информации об охлаждении форсунок ВРД, ГТД, ЭУ и организации борьбы с осадкообразованием в них можно сделать следующие выводы [1–51]:

1) в штатной форсунке ГТД марки НК-8-2У отсутствует какая-либо система защиты ее деталей от негативного процесса осадкообразования;

2) в штатной форсунке ГТД марки НК-8-2У отсутствует какая-либо система охлаждения ее деталей до температуры 373К и ниже;

3) в штатной форсунке ГТД марки НК-8-2У конструктивно отсутствует наружная рубашка охлаждения;

4) для организации борьбы с осадкообразованием и увеличения ресурса, надежности и эффективности форсунки ГТД марки НК-8-2У необходимо создать для нее наружную рубашку охлаждения, и это вполне возможно.

Если создать наружную рубашку охлаждения для данной штатной форсунки и обеспечить ее охлаждение до 373К, то ее внутренние детали не будут подвергаться осадкообразованию, а это означает, что ресурс такой форсунки может быть увеличен более чем в 2 раза. Если рубашка охлаждения будет обеспечивать охлаждение штатной форсунки до температуры выше 373К, но ниже 973К, например до 423К, то осадкообразование на поверхностях внутренних деталей форсунки будет происходить значительно медленнее, т. е. скорость увеличения толщины слоя твердого углеродистого осадка уменьшится по сравнению с таковой в штатной форсунке без рубашки охлаждения. Следовательно, итоговый ресурс и время надежной и безопасной работы такой штатной модернизированной форсунки также возрастут.

Для обеспечения еще более надежного и глубокого охлаждения форсунки можно создавать и поддерживать зону критического давления в топливоподающей системе двигателя или только в рубашке охлаждения форсунки либо форсунок; при таком давлении коэффициент теплоотдачи может увеличиваться в 2-3 раза благодаря ТФС жидкого УВГ.

Необходимо отметить, что внутри самой рубашки охлаждения форсунки тоже может происходить негативный процесс осадкообразования. Внутренние стенки рубашки, в том числе внутренние стенки входного и выходного каналов рубашки охлаждения, постепенно могут и будут покрываться слоем твердого углеродистого осадка. Здесь можно применить новый способ ограничения роста твердого углеродистого осадка [33] — путем создания оребренной поверхности внутренних стенок рубашки охлаждения, где рост осадка в углублениях между зубьями будет остановлен на высоте этих зубьев оребрения. Кроме того, организация вынужденной конвекции жидкого УВО, к тому же с формированием зоны критического давления [8], позволит обеспечить процесс надежного охлаждения внутренних стенок рубашки охлаждения, благодаря чему будут созданы условия для предотвращения образования твердого углеродистого осадка или замедления его роста.

Однако в любых случаях функция наружной рубашки охлаждения по уменьшению общего нагрева форсунки и ее внутренних деталей

будет сохранена, а это означает, что негативный процесс осадкообразования на поверхностях внутренних деталей форсунки при ее работе будет предотвращен вообще или будет снижена скорость осадкообразования на них, что в итоге приведет к увеличению ресурса форсунки, ее надежности, времени безопасной и безаварийной работы и эффективности.

Разработка новой конструктивной схемы форсунки. Борьба с осадкообразованием внутри наружной рубашки охлаждения форсунки приведет к повышению ресурса, надежности, времени безопасной и безаварийной работы и эффективности не только рубашки охлаждения, но и форсунки в целом.

Конструктивно наружную рубашку охлаждения штатной форсунки можно создать на наружной поверхности смесительной втулки, которую еще называют камерой смешения форсунки или отражателем форсунки.

Показанная на рис. 4 штатная форсунка ГТД марки НК-8-2У [8–28] состоит из корпуса 1 с двумя отверстиями — 2 и 8 — для подвода топлива, выполненного как одно целое с лопатками завихрителя 4 и смесительной втулкой 5, с центробежным распылителем 6, топливным сетчатым фильтром 3, гайкой 10 для крепления к плите и уплотнительными кольцами 7 и 9.

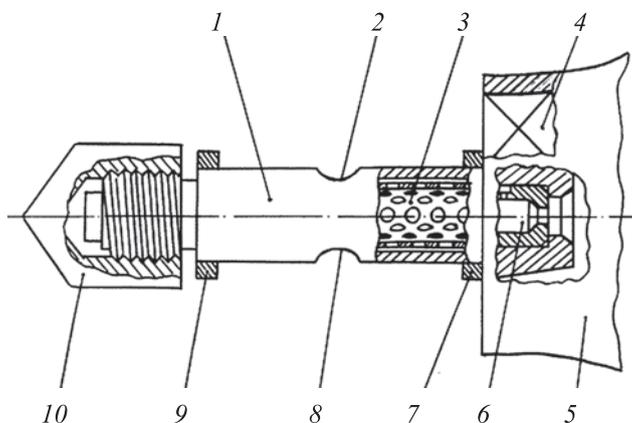


Рис. 4. Штатная форсунка ГТД марки НК-8-2У

Для модернизации штатной форсунки предложены следующие изменения:

- на наружной поверхности смесительной втулки форсунки конструктивно выполнена наружная рубашка охлаждения;
- поверхность внутренних стенок рубашки охлаждения конструктивно выполнена с искусственной шероховатостью в виде конического оребрения с высотой зубьев 3...5 мм;

– при использовании жидких УВГ и УВО в рубашке охлаждения создается и поддерживается зона критического давления, например, для жидкого УВГ марки ТС-1 $p_{кр} = 1,6 \dots 2,2$ МПа;

– для двигателей, работающих на бортовом жидком или газообразном УВГ, в рубашках охлаждения форсунок в качестве охладителей используются бортовые жидкие или газообразные УВГ, смеси жидких или газообразных УВГ, охлаждающие жидкости, вода, воздух;

– топливно-охлаждающая система форсунки выполнена в виде регенеративной, либо раздельной, либо общей, либо смешанной конструктивной схемы с индивидуальным подводом горючего или охладителя непосредственно к каждой рубашке охлаждения форсунки либо с общим подводом — сразу ко всем рубашкам охлаждения.

Модернизированная штатная форсунка с наружной рубашкой охлаждения показана на рис. 5.

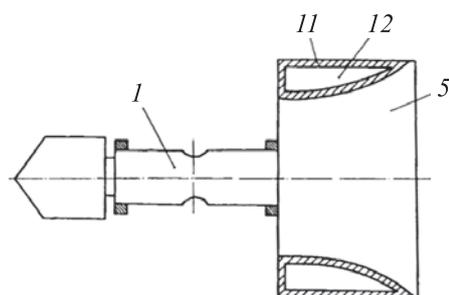


Рис. 5. Форсунка с наружной рубашкой охлаждения:

1 — корпус; 5 — смесительная втулка; 11 — стенка наружной рубашки охлаждения форсунки; 12 — внутренняя полость наружной рубашки охлаждения

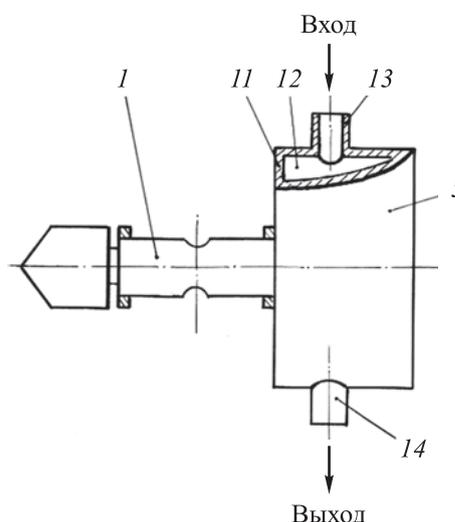


Рис. 6. Вариант наружной рубашки охлаждения форсунки с входным (13) и выходным (14) каналами

Входной канал рубашки охлаждения форсунки можно создавать разной конструкции, размещать под разными углами входа и т. д. Это же относится и к выходному каналу форсунки. Например, на рис. 6 представлен вариант наружной рубашки охлаждения форсунки, где входной канал 13 наружной рубашки охлаждения форсунки расположен вверху корпуса рубашки охлаждения, а выходной канал 14 — в низу корпуса рубашки охлаждения.

Новый способ ограничения роста твердого углеродистого осадка за счет создания оребренной конической поверхности [33] показан на

рис. 7 и 8. Чистая поверхность внутренних стенок рубашки охлаждения (см. рис. 7) конструктивно выполнена с искусственной шероховатостью в виде конического оребрения с высотой зубьев 3...5 мм (до эксплуатации форсунки) [33]. На рис. 8 продемонстрировано ограничение роста твердого углеродистого осадка на высоте зубьев оребрения (в ходе эксплуатации форсунки) [33].



Рис. 7. Оребренная внутренняя поверхность наружной рубашки охлаждения форсунки (до эксплуатации форсунки)



Рис. 8. Ограничение роста твердого углеродистого осадка за счет оребрения (в ходе эксплуатации форсунки)

Рубашка охлаждения форсунки может иметь разные конструктивные схемы: регенеративную, общую, отдельную или смешанную.

Регенеративная схема рубашки охлаждения форсунки предусматривает использование штатной системы топливоподдачи и поступление бортового жидкого УВГ (например марки ТС-1) сначала в рубашку охлаждения форсунки, а после ее прохождения — в корпус самой форсунки в область перед топливным фильтром с дальнейшим его распылом и сжиганием.

Общая схема рубашки охлаждения форсунки также предполагает использование штатной системы топливоподдачи, но поступление бортового жидкого УВГ (например марки ТС-1) осуществляется по общему подводящему каналу одновременно и в рубашку охлаждения форсунки, и в саму форсунку, где горючее после прохождения рубашки охлаждения может подаваться или в форсунку в область перед топливным сетчатым фильтром, или в общий топливный коллектор, или в топливный (например бортовой) бак.

Отдельная схема рубашки охлаждения форсунки предусматривает создание отдельной системы прокачки бортового жидкого УВГ (например марки ТС-1) или какого-либо другого охладителя через рубашку охлаждения форсунки с отдельными дополнительными подводящими и отводящими каналами, насосом и баком. При использовании для рубашки охлаждения форсунки бортового горючего его забор можно осуществлять и из штатных основных топливных баков летательного аппарата или наземной ЭУ. После прохождения бортового горючего или охладителя через рубашку (или рубашки) охлаждения форсунки бортовое горючее может быть возвращено в штатный бортовой бак, а использованный охладитель — в отдельный бак.

Смешанная схема охлаждения форсунки — это вариация каких-либо двух вышеописанных схем или совокупность всех трех схем. При такой схеме еще больше повысится надежность, выживаемость,

ресурс, эффективность и безопасность форсунки (форсунок) и самого двигателя летательного аппарата или наземной ЭУ, но такая схема будет самой громоздкой, поэтому ее следует задействовать только в наземных ЭУ.

В любой из четырех рассмотренных конструктивных схем охлаждения форсунки можно применить следующие способы подачи бортового горючего или охладителя в объем рубашки охлаждения:

– индивидуальную систему подачи бортового горючего (например марки ТС-1) или какого-либо другого охладителя в рубашку охлаждения форсунки, где обеспечивается подача бортового горючего (охладителя) к каждой рубашке охлаждения каждой форсунки;

– общую систему подачи бортового горючего (например марки ТС-1) или какого-либо другого охладителя в рубашки охлаждения форсунок, где все рубашки охлаждения всех форсунок последовательно соединены каналами и образуют общий коллектор, в котором бортовое горючее (охладитель) подводится к первой рубашке охлаждения первой форсунки, затем протекает через все последующие рубашки охлаждения всех последующих форсунок и отводится из последней рубашки охлаждения последней форсунки. Данная система менее эффективна, так как не обеспечивает одновременную работу всех рубашек охлаждения всех форсунок при запуске двигателя или ЭУ. В результате одинаковое, равномерное и эффективное охлаждение форсунок в ходе работы двигателя или ЭУ оказывается невозможным из-за нарастающего нагрева бортового горючего (охладителя) при его последовательном протекании через все рубашки охлаждения всех форсунок.

Для наземных ВРД, ГТД, ЭУ, которые могут работать как на жидком, так и на газообразном горючем, возможны следующие варианты охлаждения форсунок.

1. Если в качестве основного горючего для сжигания использовать бортовое жидкое УВГ (например марки ТС-1), то в рубашке охлаждения форсунки можно применять:

а) то же самое жидкое УВГ марки ТС-1 — при регенеративной, общей, раздельной или смешанной схеме рубашки охлаждения форсунки;

б) газообразное УВГ (например, метан или пропан) — при раздельной схеме рубашки охлаждения форсунки;

в) смесь жидких УВГ — при раздельной схеме рубашки охлаждения форсунки;

г) смесь газообразных УВГ (например, смесь метана с пропаном в разных пропорциях) — при раздельной схеме рубашки охлаждения форсунки;

д) охлаждающие жидкости [48–51] — при раздельной схеме рубашки охлаждения форсунки;

е) воду (с предварительным подогревом до положительной температуры) — при отдельной схеме рубашки охлаждения форсунки;

ж) воздух — при отдельной схеме рубашки охлаждения форсунки.

2. Если в качестве основного горючего для сжигания использовать бортовое газообразное УВГ (например, газообразный метан), то в рубашке охлаждения форсунки возможно применять:

а) то же самое газообразное УВГ (например, газообразный метан) — при регенеративной, общей, отдельной или смешанной схеме рубашки охлаждения форсунки;

б) жидкое УВГ (например марки ТС-1) — при отдельной схеме рубашки охлаждения форсунки;

в) смесь газообразных УВГ (например, смесь метана с пропаном или смеси других углеводородных газов) — при отдельной схеме рубашки охлаждения форсунки;

г) смесь жидких УВГ — при отдельной схеме рубашки охлаждения форсунки;

д) охлаждающие жидкости — при отдельной схеме рубашки охлаждения форсунки;

е) воду (с предварительным подогревом до положительной температуры) — при отдельной схеме рубашки охлаждения форсунки;

ж) воздух — при отдельной рубашке охлаждения форсунки.

Следует отметить, что, кроме жидкого УВГ и УВО марки ТС-1, в новой форсунке и в ее наружной рубашке охлаждения можно использовать и жидкие УВГ и УВО других марок: Т-1, Т-5, Т-6, РГ-1 и др. [1–20, 48–51]. Смеси жидких УВГ — это новые жидкие УВГ, полученные при смешении двух и более жидких УВГ разных марок в различных пропорциях: 50 % ТС-1 + 50 % Т-1; 50 % ТС-1 + 25 % Т-1 + 25 % Т-6 и др. Охлаждающие жидкости [48–51] — это искусственные вещества, например, антифризы марок «Тосол», «Тосол А-40М», «Тосол А-65М»; водные растворы пропилен-гликоля марок РВП-60, РВП-70 и др.; смешанные растворы воды с одним или несколькими жидкими УВГ в различных пропорциях.

Авторами статьи были проведены всесторонние тепловые и гидравлические расчеты наружной рубашки охлаждения новой форсунки, определены возможные границы понижения температуры внутренней стенки рубашки охлаждения при разных значениях давления и скорости прокачки жидкого УВГ марки ТС-1, найдены скорости образования твердых углеродистых отложений в зависимости от температуры внутренней стенки рубашки охлаждения, показан ресурс рубашки охлаждения и ее входного канала, а также самой форсунки в зависимости от температуры, которую можно достичь при прокачке ТС-1.

Для иллюстрации полученных результатов можно в качестве примера показать диаграмму скорости осадкообразования во входном

канале рубашки охлаждения новой форсунки ГТД марки НК-8-2У (рис. 9). Наименьшая скорость осадкообразования отмечается при температуре около 464К, а наибольшая — при 973К. Из диаграммы следует, что при снижении температуры наружной рубашки охлаждения форсунки до значений менее 973К скорость осадкообразования будет уменьшаться. Это приведет к увеличению ресурса наружной рубашки охлаждения и форсунки в целом.

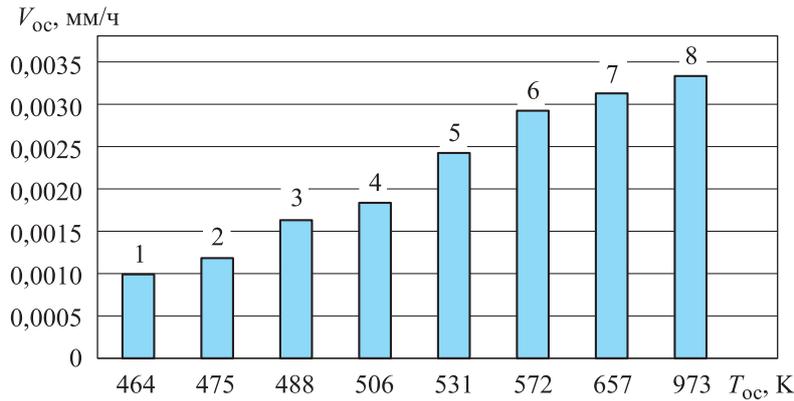


Рис. 9. Скорость V_{oc} осадкообразования во входном канале наружной рубашки охлаждения новой форсунки ГТД марки НК-8-2У

Зависимость количества часов (циклов) работы наружной рубашки охлаждения новой форсунки от температуры нагрева в ходе работы ГТД показана на рис. 10. Данная номограмма позволяет быстро определить реальный ресурс наружной рубашки охлаждения новой форсунки и самой форсунки при разных значениях температуры нагрева (охлаждения) внутренних стенок рубашки охлаждения при использовании жидкого УВГ и УВО марки ТС-1.

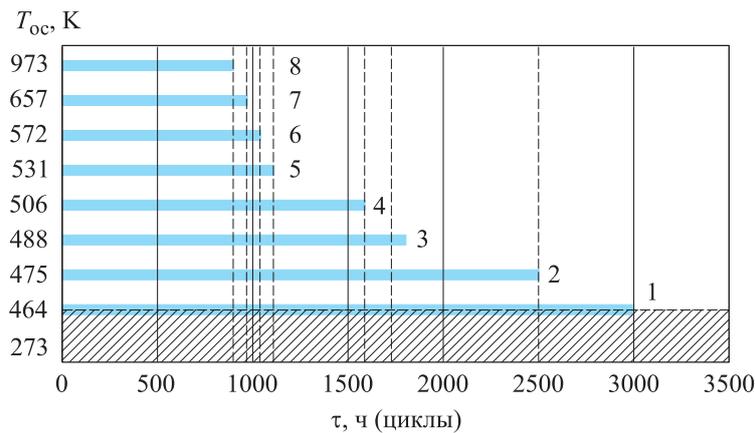


Рис. 10. Зависимость работоспособности наружной рубашки охлаждения новой форсунки и самой форсунки от степени ее нагрева (охлаждения)

Выше отмечалось: если в системе топливоподачи двигателя или ЭУ либо только в рубашке охлаждения новой форсунки создавать и поддерживать зону критического давления (например, $p_{кр} = 1,6 \dots 2,2$ МПа для ТС-1), то за счет ТФС коэффициент теплоотдачи α увеличится в 2-3 раза, а значит, уменьшится температура стенки, значение которой не должно превышать 373К. При такой температуре процесс осадкообразования не начинается, т. е. ресурс новой форсунки гарантированно может быть увеличен в 2 раза и более.

Для примера на рис. 11 показано, как уменьшается температура внутренней стенки рубашки охлаждения новой форсунки в зоне критического давления жидкого УВГ марки ТС-1 за счет ТФС. Видно, что самая низкая температура заходит в зону, где процесс осадкообразования не происходит.

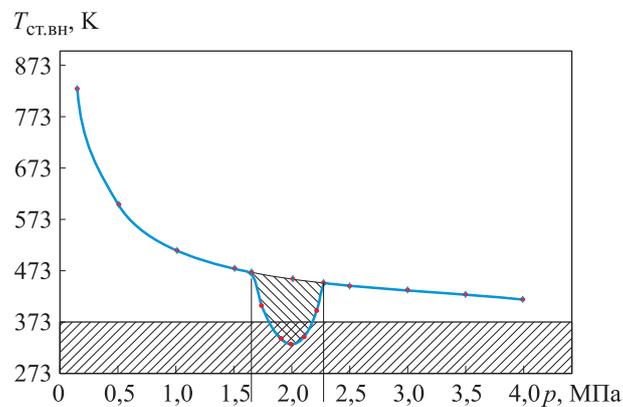


Рис. 11. Влияние давления в рубашке охлаждения новой форсунки на изменение температуры ее внутренней стенки

Коэффициент теплоотдачи α увеличивается в 3 раза в зоне критического давления жидкого УВГ марки ТС-1 за счет ТФС (рис. 12), и число Нуссельта также увеличивается в 3 раза (рис. 13).

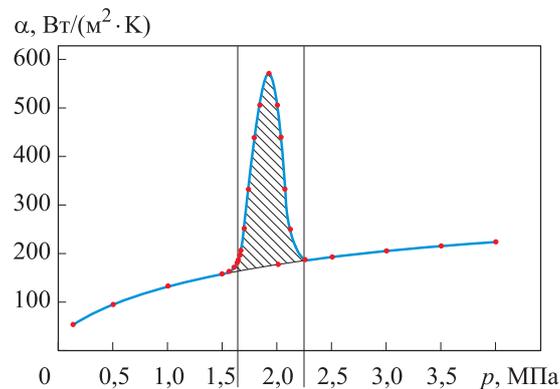


Рис. 12. Влияние давления на увеличение коэффициента теплоотдачи к жидкому УВГ и УВО марки ТС-1 в рубашке охлаждения новой форсунки

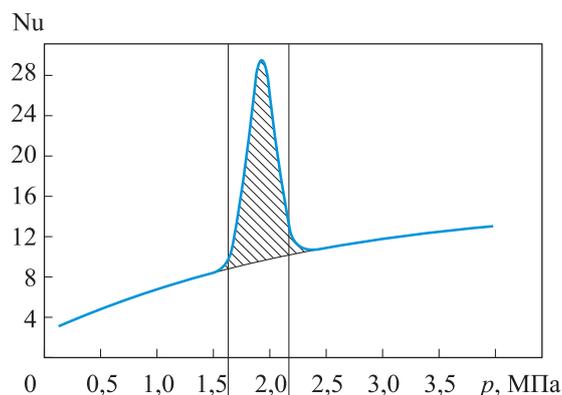


Рис. 13. Влияние давления на увеличение числа Nu в зоне критического давления

Кроме того, были проведены расчеты при использовании газообразного метана, пропана и их смесей.

Научной новизной данной работы по модернизации штатной форсунки ГТД НК-8-2У можно считать следующее:

- впервые предлагается организовать борьбу с осадкообразованием с использованием нового способа предотвращения и затормаживания роста твердого углеродистого осадка в штатной форсунке ГТД марки НК-8-2У путем охлаждения деталей форсунки до температуры 373К и ниже;

- впервые предложена реализация нового способа предотвращения и затормаживания роста твердого углеродистого осадка в штатной форсунке ГТД марки НК-8-2У путем охлаждения деталей форсунки наружной рубашкой охлаждения;

- впервые предлагается для повышения эффективности работы наружной рубашки охлаждения форсунки с бортовым жидким УВГ или УВО создавать и поддерживать зону критического давления или только в рубашке охлаждения, или во всей системе топливоподачи и охлаждения форсунки;

- впервые предлагается для ограничения роста твердого углеродистого осадка внутри наружной рубашки охлаждения модернизированной форсунки ГТД марки НК-8-2У применить новый способ ограничения роста осадка путем создания оребренной поверхности внутренних стенок рубашки охлаждения;

- впервые предложены новые конструктивные схемы охлаждения штатной форсунки ГТД марки НК-8-2У с разными системами подвода и отвода жидкого или газообразного бортового горючего или охладителя;

- впервые предлагается для двигателей, работающих на бортовом жидком УВГ, в рубашках охлаждения форсунок использовать то же бортовое жидкое УВГ, смеси жидких УВГ, охлаждающие жидкости, воду, газообразное УВГ, смеси газообразных УВГ, воздух;

– впервые предлагается для двигателей, работающих на бортовом газообразном УВГ, в рубашках охлаждения форсунок использовать такое же бортовое газообразное УВГ, смеси газообразных УВГ, охлаждающие жидкости, воду, бортовое жидкое УВГ, смеси жидких УВГ, воздух;

– впервые ресурс, время безаварийной и безопасной работы модернизированной форсунки гарантированно будут увеличены в 2 раза и более.

На данную новую конструктивную схему топливной форсунки авторы статьи получили патент на изобретение [27].

Заключение. Выполнены обзор и анализ научно-технической и патентно-лицензионной литературы, а также результатов эксплуатации ВРД, ГТД и ЭУ. Сделан вывод о необходимости создания новых топливных форсунок, в которых применялись бы существующие и новые способы борьбы с осадкообразованием. Проведены экспериментальные исследования тепловых процессов в жидких и газообразных УВГ и УВО при разных термодинамических условиях, обнаружены определенные эффекты и запатентованы новые способы предотвращения, уменьшения и ограничения осадкообразования, интенсификации теплоотдачи к жидким УВГ и УВО.

Показана возможность увеличения ресурса штатной форсунки ГТД марки НК-8-2У путем создания наружной рубашки охлаждения при использовании жидких и газообразных УВГ и УВО, а также других охладителей.

Экспериментально установлено, что охлаждение новой форсунки будет способствовать замедлению негативного процесса осадкообразования и даже его отсутствию. Применение новых способов борьбы с осадкообразованием и интенсификации теплоотдачи за счет ТФС жидких УВГ и УВО внутри наружной рубашки охлаждения новой форсунки позволит повысить ресурс и надежность не только рубашки охлаждения, но и всей форсунки в 2 раза и более.

Материалы данной статьи открывают ученым, разработчикам и конструкторам перспективы быстрой и надежной модернизации форсунок отечественных ВРД, ГТД и ЭУ различного назначения и базирования, одноразового и многократного использования, в плане увеличения их ресурса, повышения надежности, эффективности, экономичности и экологичности.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Большаков Г.Ф. *Физико-химические основы образования осадков в реактивных топливах*. Ленинград, Химия, 1972, 232 с.
- [2] Братков А.А., ред. *Химмотология ракетных и реактивных топлив*. Москва, Химия, 1987, 304 с.

- [3] Дубовкин Н.Ф., Маланичева В.Г., Массур Ю.П., Федоров Е.П. *Физико-химические и эксплуатационные свойства реактивных топлив. Справочник*. Москва, Химия, 1985, 240 с.
- [4] Алемасов В.Е., Гарифуллин Ф.А., отв. ред. *Инженерные методы определения физико-химических и эксплуатационных свойств топлив*. Казань, Мастер Лайн, 2000, 378 с.
- [5] Мякочин А.С., Яновский Л.С. *Образование отложений в топливных системах силовых установок и методы их подавления*. Москва, Изд-во МАИ, 2001, 222 с.
- [6] Алемасов В.Е., науч. ред. *Инженерные основы авиационной химмотологии*. Казань, Изд-во Казан. ун-та, 2005, 714 с.
- [7] Яновский Л.С., Харин А.А. *Химмотологическое обеспечение надежности авиационных газотурбинных двигателей*. Москва, ИНФРА-М, 2015, 264 с.
- [8] Алтунин В.А. *Исследование особенностей теплоотдачи к углеводородным горючим и охладителям в энергетических установках многогорючего использования*. Кн. 1. Казань, Казан. гос. ун-т им. В.И. Ульянова–Ленина, 2005, 272 с.
- [9] Алтунин К.В. *Функционально-стоимостной анализ горелочных устройств и форсунок*. Казань, Изд-во КНИТУ — КАИ, 2020, 156 с.
- [10] Алтунин К.В. Разработка формулы расчета температуры внутренней стенки мультитопливной форсунки с целью предотвращения осадкообразования и перегрева. *Инновационные научные исследования*, 2020, № 12-1 (2), с. 68–79. DOI: 10.5281/zenodo.4444607
- [11] Алтунин К.В. Разработка методики расчета температуры внутренней стенки мультитопливной форсунки с целью предотвращения осадкообразования и перегрева. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2021, № 6, с. 37–47. DOI: 10.18698/0536-1044-2021-6-37-47
- [12] Яновский Л.С., ред. *Некоторые пути повышения эффективности жидкостных реактивных двигателей летательных аппаратов на углеводородных и азотосодержащих горючих и охладителях*. Казань, Школа, 2020, 148 с.
- [13] Алтунин В.А., Алтунин К.В., Абдуллин М.Р., Львов М.Л., Щиголев А.А., Платонов Е.Н. и др. Некоторые пути совершенствования двигателей и энергоустановок марки «НК». Ч. 1. *Тепловые процессы в технике*, 2021, т. 13, № 12, с. 530–542. DOI: 10.34759/tpt-2021-13-12-530-542
- [14] Алтунин В.А., Алтунин К.В., Абдуллин М.Р., Львов М.Л., Щиголев А.А., Платонов Е.Н. и др. Некоторые пути совершенствования двигателей и энергоустановок марки «НК». Ч. 2. *Тепловые процессы в технике*, 2022, т. 14, № 1, с. 9–21. DOI: 10.34759/tpt-2022-14-1-9-21
- [15] Алтунин В.А. *Свойства и негативность осадкообразования в двигателях и энергоустановках на жидких углеводородных горючих и охладителях*. Казань, Школа, 2020, 130 с.
- [16] Алтунин В.А., Абдуллин М.Р. Некоторые пути совершенствования форсунок ВРД марки НК-8-2У (110-летию со дня рождения Н.Д. Кузнецова посвящается). *Международная молодежная научная конференция "XXV Туполевские чтения (школа молодых ученых)", посвящается 60-летию со дня осуществления Первого полета человека в космическое пространства и 90-летию Казанского Национального исследовательского технического университета им. А. Н. Туполева-КАИ: материалы конференции: сборник докладов: в 6 т.* Казань, Изд-во ИП Сагиева А.Р., 2021, т. 2, с. 4–10.
- [17] Абдуллин М.Р., Алтунин В.А., Алтунин К.В., Ефимов Д.Е. Некоторые пути совершенствования двигателей и энергоустановок марки «НК» на жидких и газообразных углеводородных горючих. *20-я Международная конферен-*

- ция «Авиация и космонавтика». 22–26 ноября 2021 года. Москва. Тезисы. Москва, Изд-во «Перо», 2021, с. 86–88.
- [18] Алтунин В.А., Абдуллин М.Р., Жилиякова А.Е., Пронин К.А., Яновская М.Л. Разработка новых конструктивных схем форсунок повышенных характеристик для реактивных двигателей сверхзвуковых, гиперзвуковых и аэрокосмических летательных аппаратов. *XLVIII Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства (Москва, 23–26 января 2024 года): сборник тезисов : в 3 т.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2024, т. 2, с. 433–434.
- [19] Алтунин В.А., Алтунин К.В., Абдуллин М.Р., Кореев Е.П., Пронин К.А., Алексенко И.В. и др. Пути увеличения ресурса и надежности топливных форсунок авиационных двигателей семейства «НК». *Всероссийский научно-технический форум по двигателям и энергетическим установкам имени Н.Д. Кузнецова: сборник докладов всерос. науч.-техн. форума, 10–11 октября 2024 г.* Самара, Изд-во Самарского университета, 2024, с. 70–72.
- [20] Алтунин В.А., Алтунин К.В., Абдуллин М.Р., Пронин К.А., Баданов Н.С., Жилиякова А.Е. и др. Разработка новых конструктивных схем топливных форсунок для реактивных двигателей авиационных и аэрокосмических летательных аппаратов. *Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики (АНТЭ-2024): материалы IX Всероссийской научно-технической конференции. Казань, 03–04 октября 2024 г.* Казань, Изд-во ИП Сагиев А.Р., 2024, с. 245–246.
- [21] Алтунин В.А., Алтунин К.В., Абдуллин М.Р., Пронин К.А., Баданов Н.С., Фаррахов А.Б. и др. Разработка конструктивных схем топливных форсунок реактивных двигателей воздушных и аэрокосмических летательных аппаратов. *Современные проблемы ракетной и космической техники. Сборник статей, 2024.* Казань, РИЦ «Школа», 2024, с. 153–156.
- [22] Алтунин В.А., Алтунин К.В., Абдуллин М.Р., Пронин К.А., Баданов Н.С., Алексенко И.В. и др. Применение новых способов борьбы с осадкообразованием при разработке новых конструктивных схем топливных форсунок для реактивных двигателей воздушных и аэрокосмических летательных аппаратов. *К.Э. Циолковский: ключевые идеи и современные достижения космонавтики: Материалы 59-х Научных чтений, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К.Э. Циолковского. Часть 1.* Калуга, ИП Стрельцов И.А. (Изд-во «Эйдос»), 2024, с. 186–191.
- [23] Алтунин В.А., Пронин К.А., Абдуллин М.Р., Алексенко И.В., Жилиякова А.Е., Яновская М.Л. Влияние тепловых процессов на разработку топливных форсунок воздушно-реактивных двигателей. *XLIX Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С. П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства. (Москва, 28–31 января 2025 года): сборник тезисов.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2025, т. 1, с. 275–276.
- [24] Алтунин В.А., Алтунин К.В., Абдуллин М.Р., Жилиякова А.Е., Сафина А.И., Пронин К.А. и др. Влияние особенностей тепловых процессов в жидких и газообразных углеводородных горючих и охладителях на разработку новых конструктивных схем топливных форсунок авиационных двигателей семейства «НК». *Перспективы развития двигателестроения: материалы международной научно-технической конференции имени Н.Д. Кузнецова, 18–20 июня 2025 г.* Самара, Изд-во Самар. ун-та, 2025, с. 580–583.
- [25] Алтунин К.В. Форсунка. Пат. RU № 2388966C1, опубли. 10.05.2010, бюл. № 13.

- [26] Алтунин К.В. *Форсунка*. Пат. RU № 2447362С1, опубл. 10.04.2012, бюл. № 10.
- [27] Алтунин В.А., Алтунин К.В., Алиев И.Н., Абдуллин М.Р., Гортышов Ю.Ф., Яновский Л.С., Яновская М.Л. *Форсунка с наружной рубашкой охлаждения*. Пат. RU № 2810865С1, опубл. 28.12.2023, бюл. № 1.
- [28] Алтунин В.А. *Влияние критических давлений на тепловые процессы в жидких углеводородных горючих и охладителях*. Казань, Школа, 2020, 209 с.
- [29] Алтунин В.А. *Способ интенсификации теплоотдачи к углеводородным горючим и охладителям в наземных и космических энергетических установках многоразового использования*. Пат. RU № 2467195, опубл. 10.12.2006, бюл. № 34.
- [30] Алтунин В.А. *Способ обнаружения процесса осадкообразования в энергетических установках на углеводородных горючих и охладителях*. Пат. RU № 2194974, опубл. 20.12.2002, бюл. № 35.
- [31] Алтунин В.А. *Способ оценки и поддержания надежности энергетических установок многоразового использования на углеводородных горючих и охладителях*. Пат. RU № 2215671, опубл. 10.11.03, бюл. № 31.
- [32] Алтунин В.А. *Устройство по обнаружению и замеру твердых углеродистых отложений в энергетических установках одно- и многоразового использования*. Пат. RU № 2213291, опубл. 27.09.03, бюл. № 27.
- [33] Алтунин В.А. *Способ интенсификации теплоотдачи к углеводородным горючим и охладителям в наземных и космических энергетических установках многоразового использования*. Пат. RU № 2289078, опубл. 10.12.2006, бюл. № 34.
- [34] Алтунин К.В. *Способ прогнозирования осадкообразования в энергоустановках многоразового использования на жидких углеводородных горючих и охладителях*. Пат. RU № 2467195, опубл. 20.11.2012, бюл. № 32.
- [35] Лави А., Мартелли С., Мишо М., Родригес Ж., Тьепель А. (FR). *Устройство охлаждения топливной форсунки камеры сгорания и топливная форсунка, содержащая это устройство (варианты)*. Пат. RU № 2272963С2, опубл. 27.03.2006, бюл. № 9.
- [36] Рустоми Б., Гилла П.Д., Пайпер Д.С., Бандару Р.В. (US). *Теплоизолированная топливная форсунка для газотурбинного двигателя*. Пат. № 2966158, опубл. 31.07.2019, бюл. № 22.
- [37] Бандару Р.В., Пайпер Д.С., Лайнднер С.М., Батакис Э.П., Гилла П.Д. (US). *Газотурбинный агрегат с топливной форсункой, оснащенной внутренним теплозащитным экраном*. Пат. № 2672205, опубл. 12.11.2018, бюл. № 32.
- [38] Кузнецов Н.Д., Радченко В.Д., Татаринов В.В., Маркушин Н.А., Резник В.Е., Слаута А.Н., Епейкин Л.Ф., Коровин Л.С. *Головка кольцевой камеры сгорания ГТД*. А.с. СССР № 240391А1, опубл. 30.01.1983, бюл. № 4.
- [39] Садовникова И.Г., Желтова Е.А. *Антифриз*. Пат. RU № 2219216, опубл. 20.12.2003, бюл. № 35.
- [40] Безюков О.К., Жуков В.А. *Охлаждающая жидкость для двигателей внутреннего сгорания*. Пат. RU № 2470059, опубл. 20.12.2012, бюл. № 5.
- [41] Велиханов В.А., Лопатин О.П. *Технические жидкости*. Киров, Изд-во Вятской ГСХА, 2005, 43 с.
- [42] Дуглас С.Л. (US). *Сопло горелки*. Пат. № 7993131, опубл. 09.08.2011.
- [43] Го Цинхуа, Ван Тао, Дай Чжэнхуа, Юй Гуансоу, Гун Синь, Ван Фучен и др. *Форсунка для подачи горячего кислорода и ее применение в газификаторах*. Пат. № 9481839, опубл. 01.11.2016.
- [44] Ясуюки Ямомото, Есиюки Хагихара, Наоки Сейно. *Горелка, способ эксплуатации горелки и способ плавки и рафинирования холодного источника железа*. Пат. № 2020/0011526, опубл. 01.10.2020.

- [45] Романовский Г.Ф., Сербин С.И., Ага Ю.А. *Форсунка*. А.с. СССР № 1562599, опубл. 07.05.1990, бюл. № 17.
- [46] Медведев А.В., Девятков В.В., Хрящиков М.С., Кузнецов В.А. *Топливная форсунка камеры сгорания газотурбинного двигателя*. Пат. № RU 2290565, опубл. 27.12.2006, бюл. № 36.
- [47] Бакланов А.В. *Двухтопливная форсунка*. Пат. RU № 2750402, опубл. 28.06.2021, бюл. № 19.
- [48] Денисенко И.П., Устинов Н.А., Вандышева А.А., Губатенко М.С. О возможности применения высокотемпературного охлаждения в современных поршневых двигателях внутреннего сгорания. *Интернет-журнал «Наукоеведение»*, 2017, т. 9, № 2. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/65TVN217.pdf> (доступ свободный).
- [49] ТУ 2422-008-52600040–2005. *Жидкости охлаждающие низкотемпературные «Тосол А-40М», «Тосол А-65М» и концентрат охлаждающей низкотемпературной жидкости*. 2005.
- [50] ТУ 2422-002-93747542–2010. *Растворы водные пропиленгликоля марки РВП (РВП-70)*. 2010.
- [51] ГОСТ 28084–89. *Жидкости охлаждающие низкотемпературные. Общие технические условия*. Москва, Стандартинформ, 2007, 12 с.

Статья поступила в редакцию 01.09.2025

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Алтунин В.А., Алтунин К.В., Абдуллин М.А., Гортышов Ю.Ф., Пронин К.А., Юсупов А.А., Яновская М.Л. Разработка новой конструктивной схемы форсунки с наружной рубашкой охлаждения для авиационных воздушно-реактивных двигателей и наземных энергоустановок. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2025, вып. 11. EDN JHGXHD

Алтунин Виталий Алексеевич — д-р техн. наук, профессор кафедры теплотехники и энергетического машиностроения Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева — КАИ; академик Российской академии космонавтики им. К.Э. Циолковского (РАКЦ), президент Казанского регионального отделения РАКЦ (КазРО РАКЦ), заслуженный изобретатель Республики Татарстан. e-mail: altspacevi@yahoo.com

Алтунин Константин Витальевич — д-р техн. наук, доцент кафедры теплотехники и энергетического машиностроения Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева — КАИ. e-mail: altkonst881@yandex.ru

Абдуллин Мансур Рустамович — аспирант кафедры теплотехники и энергетического машиностроения Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева — КАИ. e-mail: mansur1392@mail.ru

Гортышов Юрий Федорович — д-р техн. наук, профессор, исполняющий обязанности заведующего кафедрой теплотехники и энергетического машиностроения Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева — КАИ; президент КНИТУ — КАИ; заслуженный деятель науки Российской Федерации, заслуженный деятель науки и техники Республики Татарстан, академик Академии наук Республики Татарстан, академик Российской

академии естественных наук, академик Международной инженерной академии, академик Академии авиации и воздухоплавания им. Н.Е. Жуковского, академик Академии военных наук, почетный член Российской академии космонавтики имени К.Э. Циолковского, лауреат премии Правительства Российской Федерации в области образования, лауреат Государственной научной стипендии выдающимся ученым России, заслуженный профессор КНИТУ — КАИ. e-mail: jurij.gortyshov@kai.ru

Пронин Константин Андреевич — аспирант кафедры теплотехники и энергетического машиностроения Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева — КАИ. e-mail: kostipronin@mail.ru

Юсупов Артур Альбертович — аспирант кафедры теплотехники и энергетического машиностроения Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева — КАИ. e-mail: Ar_yusupov@mail.ru

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

Development of a new design of a nozzle with an external cooling jacket for aircraft jet engines and ground power plants

V.A. Altunin¹, K.V. Altunin¹, M.A. Abdullin¹, Yu.F. Gortyshov¹,
K.A. Pronin¹, A.A. Yusupov¹, M.L. Yanovskaya²

¹KNITU named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan, 420111, Russian Federation

²CIAM named after P.I. Baranov, Moscow, 111116, Russian Federation

The paper presents the operation analysis results of the standard fuel injector NK-8-2U air-jet engine, the resource of which is limited by the negative process of sedimentation and is 900 hours (cycles) of operation. The analysis of scientific, technical and patenting literature on injectors and burners on liquid hydrocarbon fuels was carried out. It led to a conclusion that their design schemes did not contain any existing and promising methods of combating sedimentation. The results of experimental studies with hydrocarbon fuels and coolants are shown, on the basis of which the authors created and patented new methods of monitoring and combating sedimentation. The existing and promising methods of combating sedimentation in aircraft engines and ground power plants are summarized and classified. The rationale for the need to create a new design scheme of a fuel injector with improved characteristics in terms of resource, reliability and efficiency is given. Based on the standard fuel injector of the NK-8-2U air-breathing engine, a new design scheme of a promising injector with an external cooling jacket has been developed and patented, in which the results of experimental studies and new methods of combating sediment formation have been implemented. A comparative analysis of the resource of failure-free, reliable and safe operation of both injectors has been carried out. From where it has been established that the resource of the new injector can be increased by two or more times, compared to the standard injector of an air-breathing engine or a ground-based gas turbine power plant.

Key words: fuel supply systems, injectors, aircraft jet engines, ground power plants, liquid and gaseous hydrocarbon fuels, forced convection, thermal processes, temperature, pressure, pumping speed, sedimentation, methods of combating sedimentation.

REFERENCES

- [1] Bolshakov G.F. *Fiziko-khimicheskiye osnovy obrazovaniya osadkov v reaktivnykh toplivakh* [Physicochemical bases of sediment formation in jet fuels]. Leningrad, Khimiya Publ., 1972, 232 p.
- [2] Bratkov A.A., ed. *Khimotologiya raketnykh i reaktivnykh topliv* [Chemotology of rocket and jet fuels]. Moscow, Khimiya Publ., 1987, 304 p.
- [3] Dubovkin N.F., Malanicheva V.G., Massur Yu.P., Fedorov E.P. *Fiziko-khimicheskiye i ekspluatatsionnyye svoystva reaktivnykh topliv. Spravochnik* [Physicochemical and operational properties of jet fuels. Handbook]. Moscow, Khimiya Publ., 1985, 240 p.
- [4] Alemasov V.E., Garifullin F.A., eds. *Inzhenernyye metody opredeleniya fiziko-khimicheskikh i ekspluatatsionnykh svoystv topliv* [Engineering methods for determining the physical, chemical and operational properties of fuels]. Kazan, Master Line Publ., 2000, 378 p.
- [5] Myakochin A.S., Yanovsky L.S. *Obrazovaniye otlozheniy v toplivnykh sistemakh silovykh ustanovok i metody ikh podavleniya* [Formation of deposits in fuel systems of power plants and methods of their removal]. Kazan, Master Line Publ., 2000, 120 p.

- in fuel systems of power plants and methods for their suppression]. Moscow, MAI Publ., 2001, 222 p.
- [6] Alemasov V.E., ed. *Inzhenernyye osnovy aviatsionnoy khimotologii* [Engineering fundamentals of aviation chemotology]. Kazan, Kazan University Publ., 2005, 714 p.
- [7] Yanovsky L.S., Kharin A.A. *Khimmotologicheskoye obespecheniye nadezhnosti aviatsionnykh gazoturbinnnykh dvigateley* [Chemical-based reliability assurance for aircraft gas turbine engines]. Moscow, INFRA-M Publ., 2015, 264 p.
- [8] Altunin V.A. *Issledovaniye osobennostey teplootdachi k uglevodorodnym goryuchim i okhladitelyam v energeticheskikh ustanovkakh mnogorazovogo ispolzovaniya* [Study of heat transfer characteristics to hydrocarbon fuels and coolants in reusable power plants]. Book one. Kazan, Kazan State University named after V.I. Ulyanov-Lenin, 2005, 272 p.
- [9] Altunin K.V. *Funktsionalno-stoimostnoy analiz gorelochnykh ustroystv i forsunok* [Cost-benefit analysis of burner devices and nozzles]. Kazan, KNITU–KAI Publ., 2020, 156 p.
- [10] Altunin K.V. Razrabotka formuly rascheta temperatury vnutrenney stenki multitoplivnoy forsunki s tselyu predotvrashcheniya osadkoobrazovaniya i peregreva [Development of a formula for calculating the temperature of the inner wall of a multi-fuel injector to prevent sedimentation and overheating]. *Innovatsionnyye nauchnyye issledovaniya — Innovative Scientific Research*, 2020, no. 12-1 (2), pp. 68–79. DOI: 10.5281/zenodo.4444607
- [11] Altunin K.V. Development of a technique for calculating the temperature of the multi-fuel nozzle inner wall in order to prevent sedimentation and overheating. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie — BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2021, no. 6, pp. 37–47. DOI: 10.18698/0536-1044-2021-6-37-47
- [12] Yanovsky L.S., ed. *Nekotoryye puti povysheniya effektivnosti zhidkostnykh reaktivnykh dvigateley letatelnykh apparatov na uglevodorodnykh i azotosoderzhashchikh goryuchikh i okhladitelyakh* [Some ways to increase the efficiency of liquid jet engines of aircraft on hydrocarbon and nitrogen-containing fuels and coolers]. Kazan, “School” Publ., 2020, 148 p. (ISBN 978-5-00162-290-1)
- [13] Altunin V.A., Altunin K.V., Abdullin M.R., Lvov M.L., Shchigolev A.A., Platonov E.N., et al. Some ways to improve engines and energy plants brand «NK». Part 1. *Thermal processes in engineering*, 2021, vol. 13, no. 12, pp. 530–542. DOI: 10.34759/tpt-2021-13-12-530-542
- [14] Altunin V.A., Altunin K.V., Abdullin M.R., Lvov M.L., Shchigolev A.A., Platonov E.N., et al. Some ways to improve the engines and energy plants brand «NK». Part 2. *Thermal processes in engineering*, 2022, vol. 14, no. 1, pp. 9–21. DOI: 10.34759/tpt-2022-14-1-9-21
- [15] Altunin V.A. *Svoystva i negativnost osadkoobrazovaniya v dvigatelyakh i energostanovkakh na zhidkikh uglevodorodnykh goryuchikh i okhladitelyakh* [Properties and negativity of sedimentation in engines and power plants on liquid hydrocarbon fuels and coolers]. Kazan, “School” Publ., 2020, 130 p. (ISBN 978-5-00162-299-4)
- [16] Altunin V.A., Abdullin M.R. *Nekotoryye puti sovershenstvovaniya forsunok VRD marki NK-8-2U (110-letiyu so dnya rozhdeniya N.D. Kuznetsova posvyashchayetsya)*. [Some ways to improve the VRD nozzles of the NK-8-2U brand (dedicated to the 110th anniversary of the birth of N.D. Kuznetsov)]. In: *Mezhdunarodnaya molodezhnaya nauchnaya konferentsiya “XXV Tupolevskiyechteniya (shkola molodykh uchenykh)”*, posvyashchayetsya 60-letiyu so dnya osushchestvleniya Pervogo poleta cheloveka v kosmicheskoye prostranstvo i 90-

- letiyu Kazanskogo Natsionalnogo issledovatel'skogo tekhnicheskogo universiteta im. A.N. Tupoleva – KAI: materialy konferentsii: sbornik dokladov* [The International Youth Scientific Conference “XXV Tupolev Readings (School of Young Scientists)” is dedicated to the 60th anniversary of the first human space flight and the 90th anniversary of the Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI: conf. reports]. In 6 vols. Kazan, KNITU–KAI Publ., 2021, vol. 2, pp. 4–10.
- [17] Abdullin M.R., Altunin V.A., Altunin K.V., Efimov D.E. Some ways to improve engines and power plants of the “NK” brand on liquid and gaseous hydrocarbon fuels. In: *20th International Conference “Aviation and Cosmonautics” (AviaSpace’2021). 22–26 November 2021. Moscow: Abstracts. Moscow, “Pero” Publ.*, 2021, pp. 86–88.
- [18] Altunin V.A., Abdullin M.R., Zhilyakova A.E., Pronin K.A., Yanovskaya M.L. *Razrabotka novykh konstruktivnykh skhem forsunok povyshennykh kharakte-ristik dlya reaktivnykh dvigateley sverkhzvukovykh, giperzvukovykh i aero-kosmicheskikh letatelnykh apparatov* [Development of new structural schemes of nozzles of increased characteristics for jet engines of supersonic, hypersonic and aerospace aircraft]. In: *XLVIII Akademicheskkiye chteniya po kosmonavtike, posvyashchennyye pamyati akademika S.P. Korolova i drugikh vydayushchikhsya otechestvennykh uchenykh — pionerov osvoyeniya kosmicheskogo prostranstva (Moskva, 23–26 yanvarya 2024 goda): sbornik tezisov* [XLVIII Academic Readings on Cosmonautics, dedicated to the memory of Academician S.P. Korolev and other outstanding Russian scientists — pioneers of space exploration (Moscow, January 23–26, 2024): collection of abstracts]. In 3 vols. Moscow, BMSTU-Press, 2024, vol. 2, pp. 433–434.
- [19] Altunin V.A., Altunin K.V., Abdullin M.R., Koreev E.P., Pronin K.A., Aleksenko I.V., et al. Ways to increase the resource and reliability of fuel injectors of aircraft engines of the NK family. In: *Vserossiyskiy nauchno-tekhnicheskiiy forum po dvigatelyam i energeticheskim ustanovkam imeni N.D. Kuznetsova: sbornik dokladov vseros. nauch.-tekhn. foruma, 10–11 oktyabrya 2024 g.* [All-Russian Scientific and Technical Forum on Engines and Power Plants named after N.D. Kuznetsov: Proc. of the All-Russian Scientific and Technical Forum, October 10–11, 2024]. Samara, Samara University Publ., 2024, pp. 70–72.
- [20] Altunin V.A., Altunin K.V., Abdullin MR, Pronin K.A., Badanov N.S., Zhilyakova A.E., Yanovskaya M.L. *Razrabotka novykh konstruktivnykh skhem toplivnykh forsunok dlya reaktivnykh dvigateley aviatsionnykh i aerokosmicheskikh letatelnykh apparatov* [Development of new structural diagrams of fuel injectors for jet engines of aircraft and aerospace aircraft]. In: *Problemy i perspektivy razvitiya aviatsii, nazemnogo transporta i energetiki (ANTE-2024): materialy IX Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. Kazan, 03–04 oktyabrya 2024 g* [Problems and Prospects for the Development of Aviation, Ground Transport, and Energy (ANTE-2024): Proc. of the IX All-Russian Scientific and Technical Conference. Kazan, October 3–4, 2024]. Kazan, IP Sagiev A.R. Publ., 2024, pp. 245–246.
- [21] Altunin V.A., Altunin K.V., Abdullin MR, Pronin K.A., Badanov N.S., Farrakhov A.B., Zhilyakova A.E., Yanovskaya M.L. Development of structural schemes of fuel nozzles of reactive engines of air and aerospace aircraft. In: *Sovremennyye problemy raketnoy i kosmicheskoy tekhniki. Sbornik statey, 2024* [Contemporary Issues in Rocket and Space Technology. A Coll. of Articles, 2024]. Kazan, “School” Publ., 2024, pp. 153–156.
- [22] Altunin V.A., Altunin K.V., Abdullin MR, Pronin K.A., Badanov N.S., Aleksenko I.V., Zhilyakova A.E., Yanovskaya M.L. Application of new methods to

- combat sediment formation in the development of new design diagrams of fuel injectors for jet air engines and aerospace aircraft. In: *K.E. Tsiolkovskiy: klyuchevyye idei i sovremennyye dostizheniya kosmonavtiki: Materialy 59-kh Nauchnykh chteniy, posvyashchennykh razrabotke nauchnogo naslediya i razvitiyu idey K.E. Tsiolkovskogo* [K.E. Tsiolkovsky: Key Ideas and Modern Achievements of Cosmonautics: Proceedings of the 59th Scientific Readings dedicated to the development of the scientific legacy and ideas of K.E. Tsiolkovsky]. Part 1. Kaluga, IP Streltsov I.A. (Eidos Publ.), 2024, part 1, pp. 186–191.
- [23] Altunin V.A., Pronin K.A., Abdullin M.R., Aleksenko I.V., Zhilyakova A.E., Yanovskaya M.L. Influence of thermal processes on the development of air-jet fuel injectors. In: *XLIX Akademicheskkiye chteniya po kosmonavtike, posvyashchennyye pamyati akademika S.P. Korolova i drugikh vydayushchikhsya otechestvennykh uchenykh — pionerov osvoyeniya kosmicheskogo prostranstva (Moskva, 28–31 yanvarya 2025 goda): sbornik tezisov* [XLIX Academic Readings on Cosmonautics, dedicated to the memory of Academician S.P. Korolev and other outstanding Russian scientists — pioneers of space exploration (Moscow, January 28–31, 2025): collection of abstracts]. Moscow, BMSTU-Press, 2025, vol. 1, pp. 275–276.
- [24] Altunin V.A., Altunin K.V., Abdullin M.R., Zhilyakova A.E., Safina A.I., Pronin K.A., Khabibullin A.M., Yanovskaya M.L. Influence of thermal process features in liquid and gaseous hydrocarbon fuels and coolants on the development of new design schemes of fuel injectors of aircraft engines of the “NK” family. In: *Perspektivy razvitiya dvigatelestroyeniya: materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii imeni N.D. Kuznetsova, 18–20 iyunya 2025 g.* [Prospects for the Development of Engine Engineering: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference named after N.D. Kuznetsov, June 18–20, 2025]. Samara, Samara University Publ., 2025, pp. 580–583.
- [25] Altunin K.V. *Forsunka* [Nozzle]. Patent RU No. 2388966. Publ.: 2010-05-10, Bull. No. 13.
- [26] Altunin K.V. *Forsunka* [Nozzle]. Patent RU No. 2447362. Publ.: 2012-04-10, Bull. No. 10.
- [27] Altunin V.A., Altunin K.V., Aliyev I.N., Abdullin M.R., Gortyshov Yu.F., Yanovsky L.S., Yanovskaya M.L. *Forsunka s naruzhnoy rubashkoy okhlazhdeniya* [Nozzle with an outer cooling jacket]. Patent RU No. 2810865. Publ.: 2023-12-28, Bull. No. 1.
- [28] Altunin V.A. *Vliyaniye kriticheskikh davleniy na teplovyye protsessy v zhidkikh uglevodorodnykh goryuchikh i okhladitelyakh* [The influence of critical pressures on thermal processes in liquid hydrocarbon fuels and coolants]. Kazan, “School” Publ., 2020, 209 p. (ISBN 978-5-00162-291-8)
- [29] Altunin V.A. *Sposob intensivatsii teplotdachi k uglevodorodnym goryuchim i okhladitelyam v nazemnykh i kosmicheskikh energeticheskikh ustanovkakh mnogorazovogo ispolzovaniya* [Method for intensifying heat transfer to hydrocarbon fuels and coolers in reusable ground and space power plants]. Patent RU No. 2467195. Publ.: 2006-12-10, Bull. No. 34.
- [30] Altunin V.A. *Sposob obnaruzheniya protsessa osadkoobrazovaniya v energeticheskikh ustanovkakh na uglevodorodnykh goryuchikh i okhladitelyakh* [Method for detecting the process of sediment formation in power plants using hydrocarbon fuels and coolants]. Patent RU No. 2194974. Publ.: 2002-12-20, Bull. No. 35.
- [31] Altunin V.A. *Sposob otsenki i podderzhaniya nadezhnosti energeticheskikh ustanovok mnogorazovogo ispolzovaniya na uglevodorodnykh goryuchikh i okhladitelyakh* [Method for assessing and maintaining the reliability of reusable power plants using hydrocarbon fuels and coolants]. Patent RU No. 2215671. Publ.: 2003-11-10, Bull. No. 31.

- [32] Altunin V.A. *Ustroystvo po obnaruzheniyu i zameru tverdykh uglerodistykh otlozheniy v energeticheskikh ustanovkakh odno- i mnogorazovogo ispolzovaniya* [Device for detecting and measuring solid carbon deposits in single- and multiple-use power plants]. Patent RU No. 2213291. Publ.: 2003-09-27, Bull. No. 27.
- [33] Altunin V.A. *Sposob intensivifikatsii teplootdachi k uglevodorodnym goryuchim i okhladitelyam v nazemnykh i kosmicheskikh energeticheskikh ustanovkakh mnogorazovogo ispolzovaniya* [A method for intensifying heat transfer to hydrocarbon fuels and coolants in reusable ground and space power plants]. Patent RU No. 2289078. Publ.: 2006-12-10, Bull. No. 34.
- [34] Altunin K.V. *Sposob prognozirovaniya osadkoobrazovaniya v energoustanovkakh mnogorazovogo ispolzovaniya na zhidkikh uglevodorodnykh goryuchikh i okhladitelyakh* [A method for predicting sedimentation in reusable power plants using liquid hydrocarbon fuels and coolants]. Patent RU No. 2467195. Publ.: 2012-11-20, Bull. No. 32.
- [35] Lavi A. (FR), Martelli S. (FR), Michaud M. (FR), Rodriguez J. (FR), Thiepel A. (FR). *Ustroystvo okhlazhdeniya toplivnoy forsunki kamery sgoraniya i toplivnaya forsunka, sodержashchaya eto ustroystvo (varianty)* [Combustion chamber fuel injector cooling device and fuel injector containing this device (versions)]. Patent RU No. 2272963. Publ.: 2006-03-27, Bull. No. 9.
- [36] Rustomi B. (US), Gill P.D. (US), Piper D.S., (US) Bandaru R.V. (US) *Teploizolirovannaya toplivnaya forsunka dlya gazoturbinnogo dvigatelya*. [Thermally-insulated fuel injector for a gas turbine engine]. Patent No. 2966158. Publ.: 2019-07-31, Bull. No. 22.
- [37] Bandaru R.V. (US), Piper D.S. (US), Lindner S.M. (US), Batakis E.P. (US), Gilla P.D. (US) *Gazoturbinnyy agregat s toplivnoy forsunkoy, osnashchennoy vnutrennim teplozashchitnym ekranom* [Gas turbine unit with a fuel injector equipped with an internal heat shield]. Patent No. 2672205. Publ.: 2018-11-12, Bull. No. 32.
- [38] Kuznetsov N.D., Radchenko V.D., Tatarinov V.V., Markushin N.A., Reznik V.E., Slauto A.N., Epeikin L.F., Korovin L.S. *Golovka kol'tsevoy kamery sgoraniya GTD* [Gas turbine engine annular combustion chamber head]. A.C. USSR No. 240391. Publ.: 30.01.1983.
- [39] Sadovnikova I.G., Zheltova E.A. *Antifreeze*. Patent RU No. 2219216. Publ.: 2003-12-20, Bull. No. 35.
- [40] Bezyukov O.K., Zhukov V.A. *Okhlazhdayushchaya zhidkost dlya dvigateley vnutrennego sgoraniya* [Coolant for internal combustion engines]. Patent RU No. 2470059. Publ.: 2012-12-20, Bull. No. 5.
- [41] Velikhanov V.A., Lopatin O.P. *Tekhnicheskie zhidkosti* [Technical fluids]. Kirov, Vyatka GSHA Publ., 2005, 43 p.
- [42] Douglas S.L. *Burner Nozzle*. Patent No. US 7993131. Publ.: 2011-08-09.
- [43] Qinghua Guo, Tao Wang, Zhenghua Dai, Guangxou Yu, Xin Gong, Fucheng Wang, et al. *Hot oxygen injector and its use in gasifiers*. US Patent No. 9481839. Publ.: 2016-11-01.
- [44] Yasuyuki Yamomoto, Yoshiyuki Hagihara, Naoki Seino. *Burner, Method of Burner Extraction and Method of Melting and Refining Cold Iron Source*. US Patent 2020/0011526. Publ.: 2020-10-01.
- [45] Romanovsky G.F., Serbin S.I., Aga Yu.A. *Forsunka* [Nozzle]. A.C. USSR No. 1562599. Publ.: 1990-05-07, Bul. No. 17.
- [46] Medvedev A.V., Devyatkov V.V., Khryashchikov M.S., Kuznetsov V.A. *Toplivnaya forsunka kamery sgoraniya gazoturbinnogo dvigatelya* [Fuel injector of the combustion chamber of a gas turbine engine]. Patent RU No. 2290565. Publ.: 2006-12-27, Bul. No. 36.

- [47] Baklanov A.V. *Dvukhtoplivnaya forsunka* [Dual-fuel injector]. Patent RU No. 2750402. Publ.: 2021-06-28, Bul. No. 19.
- [48] Denisenko I.P., Ustinov N.A., Vandysheva A.A., Gubatenko M.S. The possibility of using of the high-temperature cooling in the modern reciprocating internal combustion engines. *Internet journal "Naukovedenie"*, 2017, vol. 9, no. 2. Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/65TVN217.pdf> (free access).
- [49] TS 2422-008-52600040–2005. *Zhidkosti okhlazhdayushchiye nizkozamerzayushchiye «Tosol A-40M», «Tosol A-65M» i kontsentratsiya okhlazhdayushchey nizkozamerzayushchey zhidkosti* [Low-freezing cooling liquids "Tosol A-40M", "Tosol A-65M" and concentrate of cooling low-freezing liquid]. 2005.
- [50] TS 2422-002-93747542–2010. *Rastvory vodnyye propilenglikolya marki RVP (RVP-70)* [Aqueous propylene glycol solutions of PBI (PBI 70) grade]. 2010.
- [51] GOST 28084–89. *Low-freezing cooling liquids. General specifications*. Moscow, Standartinform Publ., 2007.

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

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

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

Gortyshov Yu.F., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Acting Head of the Department of Heat Engineering and Power Engineering, President, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev — KAI; Honored Worker of Science of the Russian Federation; Honored Worker of Science and Technology of the Republic of Tatarstan; Academician of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan; Academician of the Russian Academy of Natural Sciences; Academician of the International Academy of Engineering; Academician of the Academy of Aviation and Aeronautics named after N.E. Zhukovsky; Academician of the Academy of Military Sciences; Honorary Member of the Russian Academy of Cosmonautics named after K.E. Tsiolkovsky; Laureate of the Russian Government Prize in the Education Area; Laureate of the State Scientific Scholarship for the Outstanding Scientists of Russia, Honored Professor of the KNRTU–KAI. e-mail: jurij.gortyshov@kai.ru

Pronin K.A., Postgraduate, Department of Heat Engineering and Power Engineering, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI. e-mail: kostipronin@mail.ru

Yusupov A.A., Postgraduate, Department of Heat Engineering and Power Engineering, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI. e-mail: Ar_yusupov@mail.ru

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